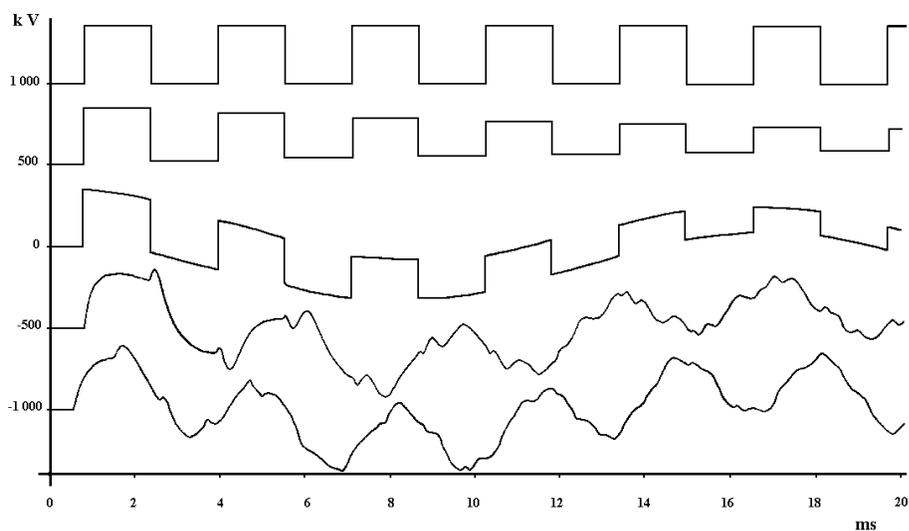


ATP ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM



CURSO BÁSICO SOBRE A UTILIZAÇÃO DO ATP

CLAUE - Comitê Latino Americano de Usuários do EMTP/ATP

Preparado por:

Jorge Amon Filho
Marco Polo Pereira

Versão Original : Setembro de 1994

Última Revisão : Novembro de 1996

Sumário

Capítulo I	Introdução ao ATP
Capítulo II	Estrutura do ATP
Capítulo III	Cálculo de Parâmetros de Linhas de Transmissão
Capítulo IV	Manobra de Bancos de Capacitores
Capítulo VI	Tensões e Correntes Induzidas em Circuitos Paralelos
Capítulo VII	Tensão de Restabelecimento Transitória
Capítulo VIII	Data Modularization
Capítulo IX	Energização de Transformadores
Capítulo X	Injeção de Surtos em Subestações
Capítulo XI	Modelagem de Fontes de Excitação para Estudos de Transitórios
Capítulo XII	Modelagem de Pára-raios de ZnO em Estudos de Sobretensões
Capítulo XIII	Casos Complementares

Capítulo I

Introdução ao ATP

1. Generalidades

A área de transitórios eletromagnéticos envolve uma ampla gama de fenômenos, provocados por variações súbitas de tensão ou corrente nos sistemas elétricos, inicialmente em estado de regime permanente na grande maioria dos casos. Essas variações súbitas de tensão e corrente são provocadas por descargas atmosféricas, faltas no sistema ou operação de disjuntores.

Um estudo de transitórios tanto pode levar à especificação dos dispositivos de proteção dos equipamentos de um sistema elétrico quanto pode permitir a determinação dos motivos que provocaram uma perturbação no sistema.

2. Ferramentas para a Simulação de Transitórios

O estudo de fenômenos transitórios em sistemas elétricos pode ser realizado através de modelos em escala reduzida, de simuladores analógicos, de simuladores digitais ou de simuladores híbridos.

Todas as ferramentas acima mencionadas apresentam resultados satisfatórios, desde que os responsáveis pela execução das simulações tenham conhecimento suficiente do assunto e das potencialidades do simulador em utilização.

Os modelos em escala reduzida tem limitada aplicação, dada as dificuldades de realização física de miniaturas dos equipamentos do sistema elétrico. Um exemplo de simulação em escala reduzida é o modelo para a análise de transitórios em linhas de transmissão quando da incidência de uma descarga atmosférica no topo de uma torre ("modelo nanossegundo"). São representados alguns vãos de linha, com os cabos e as torres em escala com relação aos componentes reais.

Os simuladores analógicos tem sido tradicionalmente utilizados para a simulação de transitórios em redes elétricas. Geralmente são conhecidos por "Analisadores de Transitórios em Redes" ou TNA (Transient Network Analyser) e não devem ser confundidos com os modelos em escala reduzida porque todos os seus componentes são baseados em equivalentes elétricos, e não em modelos reduzidos dos componentes reais. Houve uma grande evolução nos simuladores analógicos quanto a automatização e

aquisição de dados, visando aumentar a sua capacidade de simulação e manter a sua competitividade com relação a outras ferramentas, tendo em vista o elevado custo de sua utilização.

A possibilidade de acoplamento ao TNA de sistema de controle reais pode ser destacada como uma das grandes vantagens desta ferramenta.

Os simuladores digitais tem alcançado notáveis progressos, tendo em vista a evolução apresentada na velocidade de processamento e nas configurações dos computadores atuais.

Pode-se afirmar que não há grandes limitações para a modelagem de qualquer componente do sistema elétrico em programas digitais. Qualquer equivalente elétrico, ou desenvolvimento teórico, baseado em características elétricas conhecidas, ou possíveis de serem determinadas por ensaios, pode ser representado por um conjunto de instruções e acoplado num programa digital para o cálculo de transitórios. Com a evolução dos computadores, e devido aos custos envolvidos, pode-se afirmar que a tendência atual para a simulação de transitórios está nos simuladores digitais.

Os simuladores híbridos empregam modelos digitais e analógicos simultaneamente, através da utilização de acoplamentos apropriados. Apesar de seu emprego em escala comercial ainda há limitações importantes para a sua aplicação generalizada.

As comparações de resultados obtidos com estas ferramentas tendem a mostrar uma boa correlação geral, mas com diferenças em detalhes de forma de onda e, o que é mais importante, com desvios em relação aos valores obtidos de testes de campo. No entanto, pequenas diferenças podem existir mesmo de um TNA para outro e entre programas digitais.

A combinação de facilidades analógicas e digitais pode ser extremamente proveitosa e, em termos mais realísticos, os dois métodos podem ser encarados como complementares em vez de competitivos.

Nos dias de hoje, esta técnica tem sido amplamente utilizada como, por exemplo, nos estudos desenvolvidos para o sistema de Itaipu. Os casos decisivos foram selecionados no TNA e reprocessados no EMTP para a determinação dos valores empregados nas especificações de equipamentos.

Em geral os resultados obtidos, seja com o TNA ou com um programa digital, apresentam uma precisão suficiente para os estudos de sobretensões necessários a especificação dos equipamentos de sistemas de potência.

A ferramenta a ser utilizada deve ser capaz de representar parâmetros distribuídos e concentrados de modo preciso, inclusive com a dependência dos seus valores com a frequência. Em adição, deve ser capaz de representar o efeito de não-linearidades como as encontradas em pára-raios, transformadores, efeito corona, arco através dos contatos do disjuntor, etc...

Na prática nem sempre é possível, ou necessário, levar em conta todas estas necessidades e o resultado é um compromisso entre os requisitos específicos para o fenômeno em estudo e as simplificações introduzidas na modelagem dos componentes do sistema e nos processos de resolução numérica. Por outro lado, as dificuldades do cálculo de transitórios não se restringem ao método de cálculo somente. A necessidade de dados precisos e completos a respeito do sistema também apresenta os seus problemas, e

é de considerável importância, desde que a precisão de qualquer cálculo não pode ir além daquela na qual os dados são baseados.

Outro aspecto de fundamental importância, talvez o mais importante de todos, é a experiência dos responsáveis pela elaboração dos estudos.

Na prática, os três fatores mencionados acima afetam sensivelmente a qualidade dos resultados obtidos para um determinado estudo, os quais são dependentes da ferramenta utilizada, da qualidade dos dados do sistema e da experiência dos responsáveis pelo estudo.

3. Programa Digital de Transitórios Eletromagnéticos EMTP

3.1. Histórico

O programa de transitórios eletromagnéticos da Bonneville Power Administration (BPA), denominado EMTP (Electromagnetic Transients Program), foi desenvolvido por Herman W. Dommel na década de 60, com base no trabalho de Frey e Althammer (Brown Boveri, Switzerland), em Munique, Alemanha.

O programa inicial só permitia a modelagem de circuitos monofásicos através de modelos de indutâncias, resistências, capacitâncias e linhas sem perdas, incluindo uma chave e uma fonte de excitação. Os elementos concentrados utilizavam a regra de integração trapezoidal e as linhas de transmissão, o método de Bergeron.

Dommel trabalhou na BPA em vários períodos entre 1964 e 1973 no desenvolvimento de vários modelos, que foram incorporados ao programa com a ajuda de diversos colaboradores.

A partir de 1973 Dommel foi para a Universidade de British Columbia (UBC) e Scott Meyer assumiu a coordenação do desenvolvimento do programa na BPA.

A coordenação da BPA, através de Scott Meyer, estabeleceu um processo de desenvolvimento articulado com os usuários do EMTP, que tornou o programa uma ferramenta bastante poderosa para a execução de estudos de fenômenos transitórios.

Um dos elementos mais importantes para desenvolvimento do EMTP foi o estabelecimento de uma matriz do programa, a partir da qual são executadas as translações para os computadores de interesse, tais como: IBM, VAX, PRIME, UNIVAC, HONEYWEL etc...

Atualmente existem grupos de usuários do EMTP na Europa, Índia, Japão, Austrália e América-Latina

Em 1984, o Electric Power Research Institute decidiu investir no programa EMTP, com base numa pesquisa realizada entre os usuários norte-americanos do programa. Foi criado o grupo de desenvolvimento do EMTP (DCG - Development Coordination Group), com a participação de BPA, Bureau of Reclamation, Western Area Power Administration, Ontario Hydro, Hydro Quebec, Canadian Electrical Association e ASEA, com a finalidade de melhorar os modelos existentes, criar novos modelos e melhorar a documentação atual.

Divergências entre Scott Meyer e EPRI levaram à criação de uma nova versão do EMTP (baseada na versão M39), a qual foi enviada para a Bélgica, onde foi instalado o Leuven EMTP Center (LEC). Esta nova versão é denominada ATP (Alternative Transients Program) mas, na realidade, é apenas um continuação das versões anteriores do programa EMTP.

O LEC centralizou a distribuição do programa a nível mundial até o final de 1992 quando, então, a BPA e Scott Meyer decidiram novamente exercer a coordenação do programa.

3.2. Informações Gerais

O ATP é um programa digital que dispõe de versões específicas para diversos tipos de computadores e sistemas operacionais, como por exemplo: IBM, VAX, APOLLO, PCXT/AT, PC386 e SUN, sendo apropriado a micro-computadores e computadores de grande porte.

O programa ATP permite a simulação de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas, com configurações arbitrárias, por um método que utiliza a matriz de admitância de barras. A formulação matemática é baseada no método das características (método de Bergeron) para elementos com parâmetros distribuídos e na regra de integração trapezoidal para parâmetros concentrados. Durante a solução são utilizadas técnicas de esparsidade e de fatorização triangular otimizada de matrizes.

Como um programa digital não permite obter uma solução contínua no tempo, são calculados valores a intervalos de tempo discretos.

O programa permite a representação de não-linearidades, elementos com parâmetros concentrados, elementos com parâmetros distribuídos, chaves, transformadores, reatores, etc..., os quais são descritos mais detalhadamente nos próximos itens.

De uma forma geral, são considerados parâmetros em componentes de fase e em sequência zero e positiva, dependendo do modelo.

A documentação do ATP consiste basicamente de um manual (ATP Rule-Book), onde estão todas as informações sobre os modelos disponíveis. O LEC edita o EMTP News, onde são apresentados artigos de interesse dos usuários do programa. Devido a abrangência do ATP e a sua utilização a nível internacional, existe farta literatura sobre a sua utilização em artigos publicados na CIGRÉ no IEEE, no SNPTTE, etc...

3.3. Modelos Disponíveis no ATP

3.3.1. Elementos Concentrados

É possível a representação de resistências, indutâncias e capacitâncias sem acoplamento entre fases, como indicado na Figura 1.

Estes elementos podem ser conectados em qualquer disposição formando componentes de filtros, bancos de capacitores, reatores de linha, equivalentes de rede, etc. O ponto de conexão ao circuito é definido pela denominação dos nós.

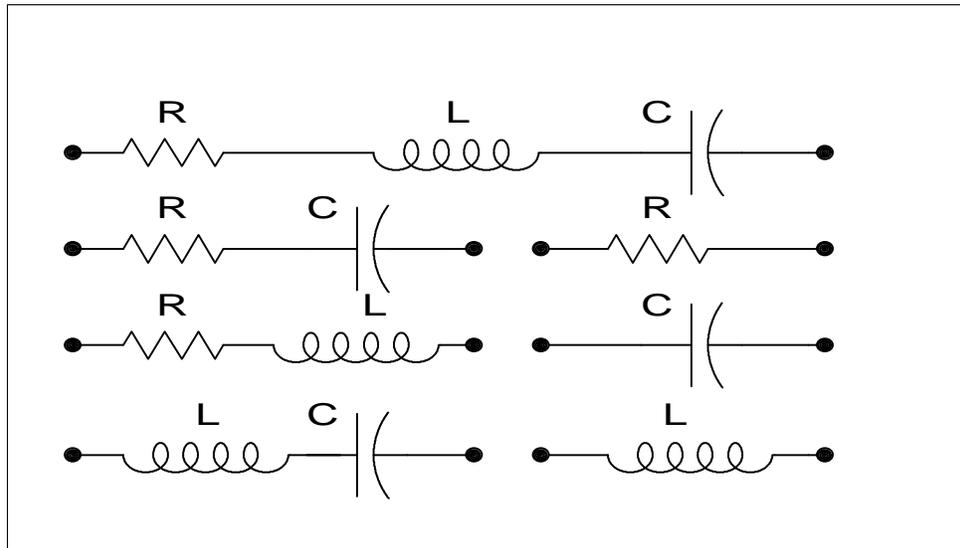


Figura 1 - Resistências, Indutâncias e Capacitâncias

3.3.2. Elementos R-L Acoplados

Elementos R-L com acoplamento entre fases, para qualquer número de fases, podem ser representados como mostrado na Figura 2.

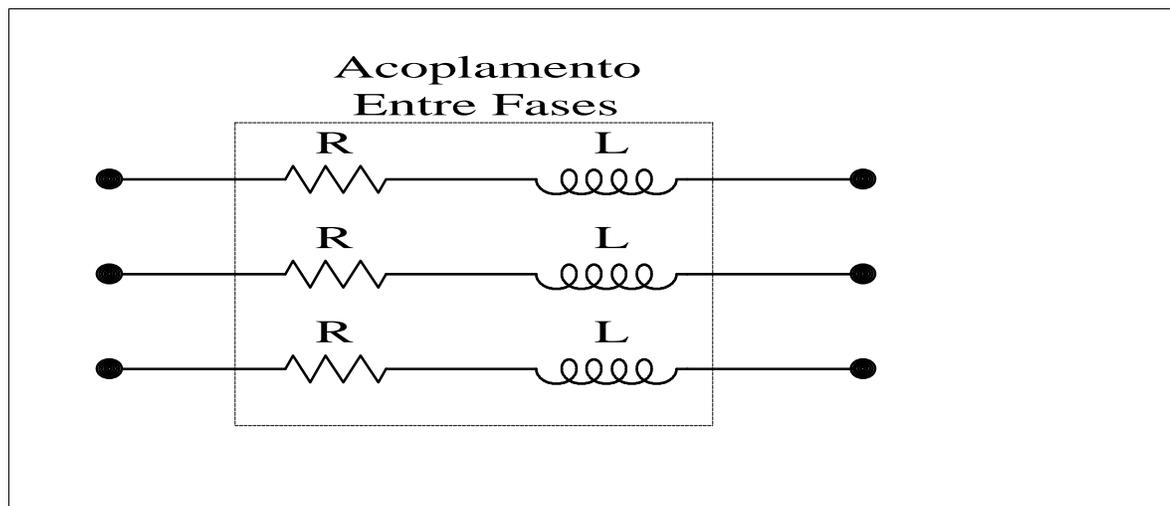


Figura 2 - Elemento R-L Acoplado

A principal finalidade destes elementos é a aplicação em equivalentes de rede, sendo inclusive possível a sua utilização diretamente em parâmetros de sequência zero e positiva.

3.3.3. PI - Equivalentes Polifásicos

Um elemento do tipo PI - equivalente com acoplamento entre fases, para qualquer número de fases, pode ser representado, tal como indicado na Figura 3 para um circuito trifásico, por exemplo.

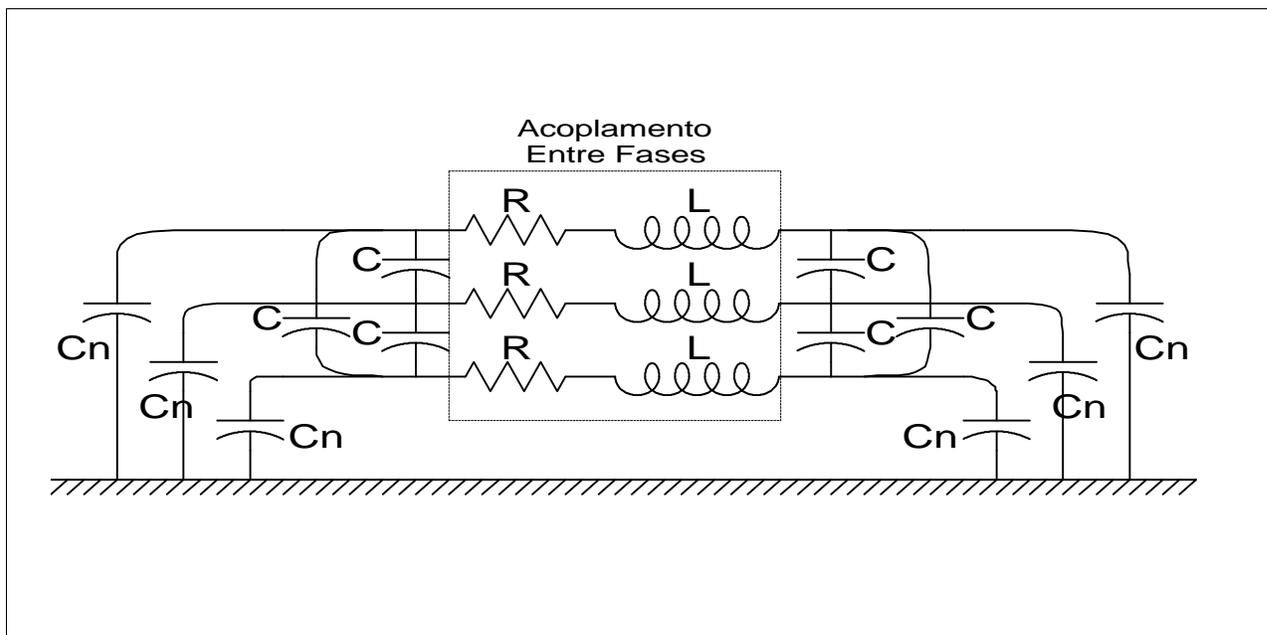


Figura 3 - PI - Equivalente

O elemento em questão pode ser utilizado tal como o elemento indicado no item 3.3.2, se as capacitâncias forem omitidas, e como uma matriz de capacitâncias, se a indutância for omitida e a resistência for fornecida como um valor muito elevado com o outro terminal aterrado.

A finalidade principal está na representação de linhas de transmissão onde este tipo de modelagem é aceitável.

Para utilização somente na solução de regime permanente, existe uma opção chamada de "cascaded PI", a qual consiste na associação de vários PI's em série, sendo permitida a inclusão de elementos em série ou em derivação. Este modelo foi desenvolvido para aplicação em estudos de circulação de correntes em cabos pára-raios, onde é necessária uma representação detalhada de cada vão de linha.

3.3.4. Transformadores

Transformadores monofásicos com vários enrolamentos podem ser representados conforme o circuito equivalente mostrado na Figura 4.

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.

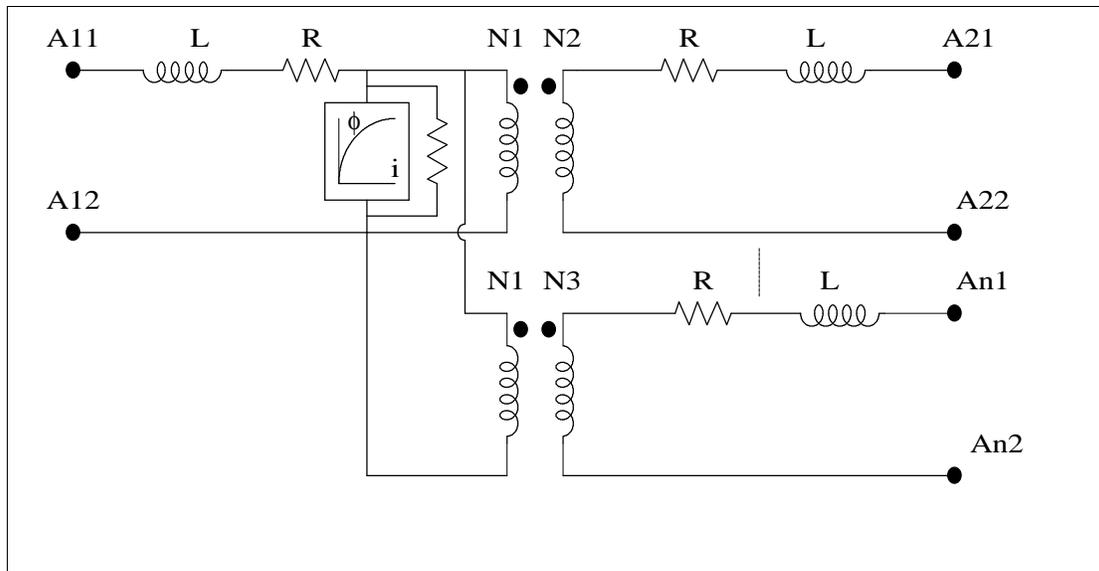


Figura 4 - Circuito Equivalente para um Transformador de N Enrolamentos

O ramo magnetizante pode ser ignorado e conectado em qualquer terminal utilizando-se um 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 (ver item 3.3.6.).

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 reduzidos 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 (item 3.3.2.). 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 subrotina 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.

3.3.5. Linhas de Transmissão

Os modelos de linhas de transmissão disponíveis no ATP são bastante flexíveis e atendem às necessidades mais frequentes dos estudos de transitórios.

As linhas de transmissão podem ser representadas por uma cadeia de PI's ou por parâmetros distribuídos, opção esta que pode ser desdobrada em várias alternativas.

A quantidade de seções de linhas necessárias depende do grau de distorção que pode ser admitido no estudo a ser realizado, sendo muito importante a faixa de frequências provocada pelo fenômeno em análise. Uma quantidade maior de elementos produz menos distorção e vice-versa.

Na prática, a determinação da quantidade de seções de linha tem se baseado na grande experiência acumulada com este tipo de representação e é usual se adotar uma seção de linha a cada 15 ou 30 km, conforme o comprimento total da linha e o estudo a ser realizado.

A representação por parâmetros distribuídos pode ser efetuada com ou sem variação dos parâmetros com a frequência.

As linhas modeladas por parâmetros distribuídos à frequência constante podem ser do tipo "sem distorção" ou do tipo "com distorção". No primeiro tipo apenas os parâmetros L e C da linha são considerados e no segundo tipo a resistência da linha é adicional, sendo 25% em cada extremidade e 50% no meio da linha. Estudos realizados demonstraram que a subdivisão da linha em mais pontos não se mostrou necessária. Este procedimento simplifica acentuadamente as equações de propagação na linha.

Na prática, os modelos de linhas com parâmetros distribuídos apresentam resultados plenamente satisfatórios e são utilizados na maioria dos estudos de transitórios em sistemas elétricos, não sendo essencial a utilização de modelos com parâmetros variando com a frequência.

No entanto, considerando que a modelagem teoricamente mais correta é aquela que leva em conta a variação dos parâmetros com a frequência, havendo inclusive casos em que este efeito é importante para a obtenção de resultados confiáveis, foram desenvolvidos e incorporados no ATP diversos métodos para efetivar este tipo de modelagem.

Foram elaborados os seguintes métodos para modelagem de uma linha de transmissão com variação dos parâmetros com a frequência: Meyer-Dommel's Weighting Function Model (1974), Semlyen's Recursive Convolution Model e Ametami's Linear Convolution Model (1976), Hauer's Model (1979) e Marti's Model (1981).

A medida que o EMTP foi evoluindo, ficou constatado que os modelos indicados acima continham deficiências sérias, havendo inclusive um descrédito muito grande quanto a sua confiabilidade. Com o passar dos anos, houve uma reformulação dos modelos mais antigos e uma evolução natural em direção aos modelos mais recentes, que são os modelos JMARTI e SEMLYEN.

O EMTP apresenta ainda um modelo para linhas com parâmetros distribuídos para linhas de circuito duplo ou na mesma faixa de passagem. A representação é aproximada porque considera os dois circuitos totalmente transpostos e acoplamento entre os parâmetros de sequência zero de cada circuito.

3.3.6. Elementos não-lineares

O programa permite a representação de resistências e indutâncias não-lineares, sendo disponíveis diversas alternativas para esta finalidade.

Basicamente, as seguintes características podem ser modeladas no EMTP, como mostrado na Figura 5.

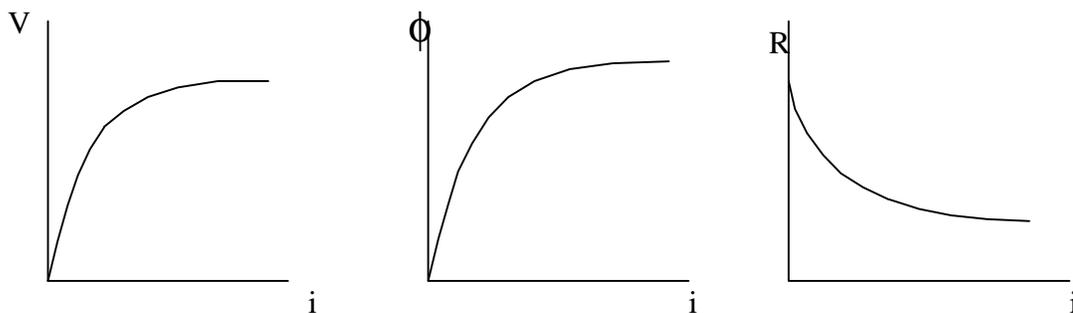


Figura 5 - Características Não-Lineares Básicas

As resistências são representadas através de pontos no plano tensão-corrente (V, i) e as indutâncias por pontos no plano fluxo-corrente (ψ, i), havendo possibilidade de se representarem resistências variáveis em função do tempo.

As resistências não-lineares podem ser utilizadas para representar pára-raios de uma maneira simplificada ou então como complemento para uma modelagem mais complexa utilizando-se a subrotina TACS. Neste caso, a tensão através do "gap" é representada com os elementos da TACS.

As resistências não-lineares em função do tempo (R, t) tem aplicação restrita, sendo as suas aplicações vislumbradas somente para a simulação de impedâncias de aterramento de estruturas para estudos de "lightning", simulação de arco em disjuntores e simulação de chaves. Neste último caso, existem modelos específicos que devem ser utilizados.

3.3.7. Chaves

O programa ATP contém uma variedade muito grande de modelos de chaves. A exemplo do TNA, a sequência de chaveamento é que define o tipo de estudo a ser efetuado, inclusive no que se refere à facilidade de tratamento das informações obtidas do cálculo de transitórios propriamente dito. Podem ser representadas chaves de tempo controlado, chaves estatísticas, chaves sistemáticas, chaves controladas por tensão ou por sinais, bem como chaves de medição.

As chaves de tempo controlado podem efetuar as operações de fechamento e de abertura em tempos especificados pelo usuário. Estas operações são realizadas uma única vez, sendo que a abertura ocorre nos zeros de corrente ou conforme uma determinada margem de corrente. Estas chaves simulam o comportamento de um disjuntor, com exceção do arco elétrico entre contatos, e podem ser dispostas de modo a representar também resistores de pré-inserção na abertura ou no fechamento.

As chaves estatísticas e as sistemáticas são utilizadas para simular o disjuntor considerando-se também a dispersão existente entre os tempos de fechamento de cada contato. As estatísticas têm os tempos de fechamento gerados conforme uma distribuição estatística do tipo normal ou do tipo uniforme, cujos parâmetros (tempo médio e desvio padrão) são definidos pelo usuário. Podem ser utilizadas para os contatos principais e para os contatos auxiliares do disjuntor. As sistemáticas executam a mesma função, porém com tempos de fechamento gerados de acordo com uma determinada lei de formação.

Tanto as chaves estatísticas quanto as chaves sistemáticas são utilizadas para uma única operação de fechamento e existe a possibilidade de uma chave estar relacionada com uma outra chave estatística (os tempos de fechamento são gerados aleatoriamente a partir dos tempos de fechamento de uma outra chave estatística). É possível ainda que a abertura de uma chave seja estatística.

As chaves controladas por tensão tem uma determinada sequência de operação especificada pelo usuário de modo que a chave, estando originalmente aberta, feche após um tempo superior a um determinado tempo, desde que a tensão através da chave seja superior ao valor estabelecido pelo usuário. Após o fechamento é decorrido um intervalo de tempo para a abertura dentro da margem de corrente pré-fixada. Esta sequência permanente efetiva durante a simulação.

As chaves controladas por sinais são aquelas que recebem sinais provenientes da TACS e cuja função principal se refere à simulação de diodos e tiristores.

As chaves de medição são aquelas que se encontram permanentemente fechadas e cuja finalidade é somente a de monitorar corrente e energia ou potência.

Podem ser utilizadas combinações das chaves descritas acima de diversas formas de modo a atender às necessidades do estudo.

Uma das aplicações mais interessantes é a utilização de chaves estatísticas para a determinação de uma distribuição de sobretensões decorrentes de uma determinada manobra numa linha de transmissão, energização ou religamento, sendo usual distribuições provenientes de 50 ou 100 chaveamentos. Estes números para levantamento de distribuições estatísticas normalmente requerem tempos de processamento bastante elevados.

3.3.8. Fontes

O programa permite representação de fontes de excitação, em tensão ou corrente, as quais são definidas analiticamente dentro do programa.

É possível a simulação de fontes de excitação com formas de onda conforme indicado na Figura 6.

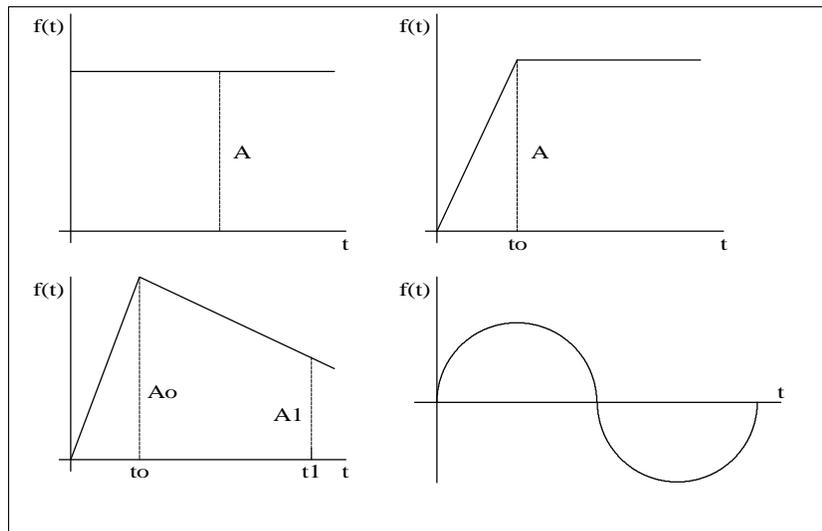


Figura 6 - Formas de Onda Básicas das Fontes de Excitação

A associação de duas ou mais das fontes indicadas na Figura 6 permite a representação de uma função composta, por exemplo, como a indicada na Figura 7.

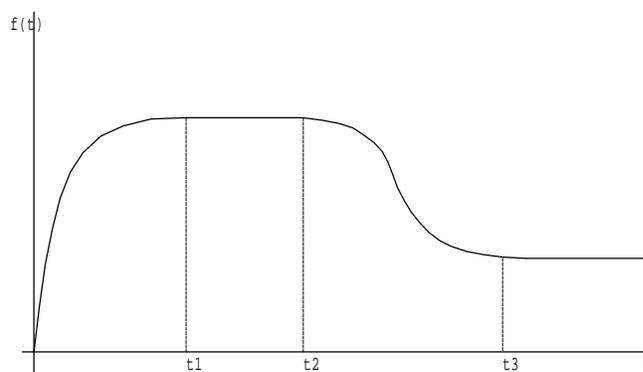


Figura 7 - Forma de Onda Composta

O usuário tem ainda a opção de definir suas próprias fontes de excitação, seja ponto a ponto, ou através da subrotina TACS ou então através de comandos em FORTRAN.

É ainda possível a utilização de fontes do tipo exponencial dupla e de máquinas girantes, sejam elas máquinas síncronas, máquinas de indução ou máquinas de corrente contínua.

A modelagem de máquinas girantes compreende a parte elétrica e a parte mecânica. Por exemplo, um dos modelos para máquinas tem as seguintes características principais: representação da máquina pelas equações de Park com um máximo de dois circuitos no rotor para cada eixo, possibilidade de representação de todas as massas girantes e do sistema de excitação do circuito de campo elétrico.

Os estudos de sobretensões geralmente são efetuados com as fontes do tipo "barra infinita" (V e f constantes), havendo situações onde uma fonte programada através da TACS (V e f variáveis) é mais

recomendada. Em casos especiais, é necessário considerar toda a representação elétrica da máquina, por exemplo: estudos de auto-excitação em compensadores síncronos.

A parte mecânica normalmente não é necessária, e mesmo a parte elétrica, porque as constantes de tempo envolvidas são muito elevadas, acarretando um tempo de resposta muito superior àquele de interesse para o estudo.

Quando um fenômeno de interesse é localizado em algum componente da máquina, a situação é completamente diferente e a modelagem deve ser a mais completa possível, por exemplo: cálculos de esforços torsionais em eixos de turbogeradores e estudos de ressonância subsíncrona.

3.3.9. Pára-raios

Os elementos do tipo resistor não-linear são adequados para a representação de pára-raios do tipo convencional (pára-raios com "gap") e do tipo ZnO (somente resistor não-linear), tal como já mencionado no item 3.3.6. acima.

Devido à grande importância que este elemento tem em estudos de transitórios, principalmente quando são empregados pára-raios ZnO, foram desenvolvidos alguns modelos com o objetivo de prover o programa de componentes cada vez mais capazes de representar o comportamento real destes equipamentos.

A utilização de componentes da subrotina TACS associados a resistores não-lineares permite a representação de um pára-raios de "gap" ativo exatamente com as mesmas características do modelo utilizado no TNA.

Os pára-raios de ZnO, os quais são constituídos somente por blocos de resistores não-lineares, podem ser representados com os elementos descritos no item 3.3.6. ou então de forma mais completa, isto é, com maior flexibilidade, através de um outro modelo baseado em ajustes da característica através de equações exponenciais com dois segmentos, um para uma faixa de correntes inferior e outro para uma faixa de correntes superior. É permitida também a inclusão de "gaps" em paralelo com uma pequena quantidade de pastilhas ou em série com todo o conjunto (este "gap" série é diferente do "gap" ativo utilizado no pára-raios convencional).

3.3.10. Compensadores Estáticos e Válvulas Conversoras

O ATP não dispõe de modelos para a representação de compensadores estáticos ou de válvulas conversoras, mas contém todos os componentes necessários para esta finalidade, através das rotinas TACS e MODELS.

Os elementos da TACS, ou da MODELS, podem ser utilizados para a modelagem dos equipamentos descritos acima, tanto no que se refere à interação destes equipamentos com a rede elétrica como para a

análise de componentes utilizados para executar determinadas funções dentro do equipamento como um todo, por exemplo: sistemas de controle, sistemas de disparo das válvulas, sistemas de medição, etc...

O principal problema associado a este tipo de modelagem é a falta de informações detalhadas a respeito do equipamento de cada fabricante. Outro problema de igual relevância é a complexidade desta modelagem, complexidade esta que dificulta o desenvolvimento dos modelos em questão e que faz com que os casos processados, considerando estes modelos juntamente com a rede elétrica, sejam de custo muito elevado.

3.4. Resultados Disponíveis no EMTP

A resposta da rede elétrica no tempo é disponível para tensões de barras e de ramos, e para correntes de ramos, através de uma tabela de valores ou de gráficos produzidos pela impressora ou pelo traçador de gráficos do tipo Calcomp ou similar. Dependendo das facilidades das instalações do centro de processamento é possível a utilização de terminais gráficos.

Os estudos estatísticos de transitórios têm os resultados apresentados sob a forma de distribuições, sendo fornecidos os valores médios e desvios padrão e histogramas das grandezas especificadas.

É possível a obtenção da solução em regime permanente, sendo impressos todas as tensões de barras, fluxos de potência e correntes nos ramos da rede em estudo.

O programa permite também a obtenção de valores de potência e energia em determinação elementos da rede.

A utilização de elementos da TACS e da MODELS permite uma grande quantidade de alternativas para a medição de grandezas não fornecidas diretamente pelo programa ou mesmo para o pós-processamento das grandezas calculadas pelo ATP.

3.5. Estrutura Geral do Programa (Entrada de Dados)

Basicamente existem cartões, ou conjuntos, obrigatórios e cartões, ou conjuntos, opcionais, bem como cartões complementares cuja definição depende de informações contidas em cartões anteriores. Uma característica marcante dos cartões obrigatórios é a necessidade de um cartão em branco ao término destes cartões, mesmo que não existam elementos pertencentes a este conjunto.

As informações constantes de cada cartão são bem específicas e estão indicadas com detalhes na referência 4.4.

De um modo geral, as informações necessárias para processamento de casos no ATP envolvem o fornecimento de cartões de informações gerais (passo de integração, tempo máximo de simulação, frequência de saída de resultados, etc.), cartões para ramos lineares e não-lineares (reatâncias, capacitâncias, resistências, transformadores, pára-raios, etc) cartões para chaves, cartões para fontes, cartões para definição das tensões nas barras (saída de resultados) e cartões para a obtenção de gráficos.

3.6. Informações Complementares

O programa ATP é uma ferramenta de grande flexibilidade e de grande importância na realização de estudos de transitórios em sistemas de potência, ou mesmo de estudos em regime permanente onde a

topologia da rede ou o problema a ser estudado não permite uma simples representação monofásica, conforme tem sido comprovado nos diversos anos de sua utilização no Brasil e pela sua grande aceitação em termos mundiais. No entanto, a diversidade de opções de modelagem que oferece, e a extensa gama de estudos que permite realizar, fazem com que o usuário seja responsável por uma série de decisões, que vão desde a escolha do passo de integração mais adequado até a análise dos resultados obtidos, tornando a sua missão de difícil execução.

É de grande importância a experiência do usuário para a obtenção de resultados confiáveis, sendo recomendável que os principiantes sejam sempre orientados por um usuário mais experiente ou então que adquiram a necessária experiência partindo de simulações bem simples.

A seleção do intervalo de integração é bastante influenciada pelo fenômeno que se está investigando. Simulação envolvendo altas frequências requerem passos de integração muito pequenos, enquanto que fenômenos de baixas frequências podem ser calculados com passos de integração maiores. Por exemplo, nos estudos de transitórios de manobra a faixa do intervalo de integração está entre 25 a 100 μ s e nos estudos de "lightning" entre 0,01 e 0,1 μ s.

O tempo máximo de simulação também depende muito do fenômeno em análise, e em algumas situações dos próprios resultados obtidos durante a realização do estudo. Estudos de "lightning" não necessitam mais de 20 μ s de simulação e energização de linhas de transmissão podem ser analisadas com 50 ms de simulação.

O ATP dispõe de uma crítica para verificação dos dados de entrada e a maioria dos erros banais é facilmente verificada pela leitura e análise da mensagem de erro fornecida pelo programa.

O mesmo código ATP contém diversas rotinas auxiliares de suporte e mesmo programas completos, como é o caso do programa de cálculo de parâmetros de linhas e cabos subterrâneos, do programa de análise transitória de sistemas de controle (TACS) e do programa MODELS (general-purpose algorithmic simulation tool).

A Figura 8 apresenta um diagrama de blocos típico para a TACS.

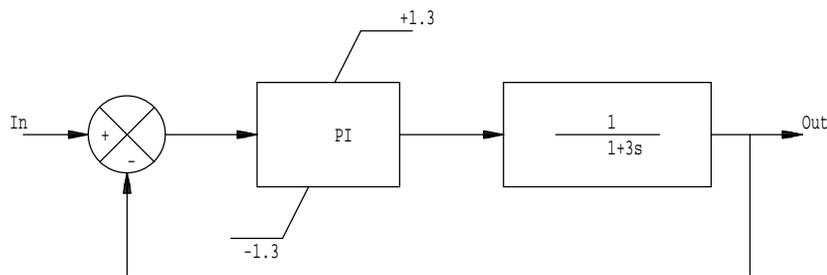


Figura 8 - Diagrama de Blocos Típico

A rotina TACS foi desenvolvida para simular interações dinâmicas entre a rede elétrica e os sistemas de controle de um determinado equipamento. Os sistemas de controle podem ser descritos por diagramas de blocos no domínio da frequência com configurações arbitrárias dos elementos disponíveis. É permitida a representação de funções de transferência, somadores, multiplicadores, limitadores estáticos

e dinâmicos, funções algébricas e lógicas, fontes de sinal, chaves controladas, funções definidas pelo usuário, detectores de sinais, etc. Esta rotina é de grande utilidade e uma descrição mais detalhada a respeito das facilidades que oferece pode ser encontrada na referência 4.4.

A rotina MODELS é uma versão moderna da TACS. Apresenta vantagens na representação de sistemas de controle complexos e se constitui em ferramenta muito poderosa para a simulação de algoritmos de sistemas de controle.

A resposta harmônica de uma rede elétrica pode ser obtida através da utilização de um procedimento automatizado do ATP que executa a variação de frequência da fonte de excitação do sistema para a faixa de frequências especificada pelo usuário. Utilizando-se uma fonte de excitação de corrente igual a 1 ampère, aplicada a barra para a qual se deseja obter a resposta harmônica, é possível se conhecer o valor da tensão nesta barra, o qual é igual em módulo à impedância que se deseja calcular.

4. BIBLIOGRAFIA

- 4.1. Electric Power Research Institute, "Transmission Line, Reference Book - 345 kV and Above - Second Edition".
- 4.2. Bonneville Power Administration, "Electromagnetic Transients Program (EMTP) Rule Book", Apr. 82.
- 4.3. M. P. Pereira, E.B. Guimarães, "Programa Digital de Transitórios Eletromagnéticos da BPA (EMTP) - Implantação do Programa do Brasil e Experiência de FURNAS na Realização de Estudos com este Programa", CIER, Montevideo, 1980.
- 4.4. Working Group 05 of Study Committee no 13 - CIGRÉ, "The Calculation of Switching Surges - Part III", Electra nº 62, Jan. 1979.
- 4.5. M.P.Pereira, J. Amon Filho, C.S. Fonseca, D. S. Carvalho Jr., "Experiência de Utilização do Programa ATP-Micro em Simulação de Transitórios Eletromagnéticos", XI SNPTEE, Rio de Janeiro, 1991.

Capítulo II

Estrutura do ATP

1. Introdução

O programa ATP, devido a extensa gama de fenômenos aos quais se aplica e dada as suas características muito particulares (programa distribuído livremente a qualquer usuário e desenvolvido por muitos colaboradores), não tem uma documentação que possa ser considerada satisfatória, principalmente para usuários inexperientes. O manual do programa é muito extenso, contém informações sobre vários aspectos do ATP, e, por estes motivos, há uma dificuldade muito grande para a sua consulta.

Outros aspectos que aumentam o grau de dificuldade para os iniciantes é a grande quantidade de modelos para um mesmo componente e a existência de vários programas e rotinas agrupados no mesmo código.

Neste item serão apresentadas algumas informações sobre a estrutura do ATP, no que se refere à preparação e montagem de um caso, tendo em vista as informações constantes do manual de utilização.

2. Estrutura Geral do Programa

A seção 1-I do manual (ATP Rule Book) apresenta a estrutura completa dos dados de entrada do programa ATP, a qual é reproduzida de forma resumida na Figura 1.

Cada caso é composto por um conjunto de informações, agrupadas por classes e dispostas em determinada ordem. Esta restrição pode ser removida com a utilização das facilidades do programa que permitem entrar com os dados fora de ordem.

A estrutura de um arquivo para processamento de uma simulação no ATP depende do caso sendo executado, havendo conjuntos de informações que são essenciais e conjuntos que são opcionais.

A lista de dados apresentada na Figura 1 mostra as várias possibilidades no que diz respeito aos grupos de informações distintos que compõem um caso para a simulação de uma rede elétrica. Na maioria dos casos as simulações utilizam apenas alguns dos grupos indicados.

```

1.BEGIN NEW DATA CASE

2.C First of an arbitrary number of comment cards at start
   < < Etc... > >
   C Last of an arbitrary number of comment cards at start

3.Special request cards ( if any )

4.Miscellaneous data cards and extensions

5.TACS HYBRID or TACS STAND ALONE or MODELS    --.
   cards that define TACS or MODELS modeling :
   tranfer function blocks, integrators, etc...  =====> present
                                                    only
                                                    if
                                                    TACS or MODELS
                                                    usage
   BLANK card terminating all TACS data         --'

6.Cards for linear and nonlinear branches, transformers and transmission lines

   BLANK card ending all BRANCH cards

7.Cards for electric network switches

   BLANK card ending all SWITCH cards

8.Source cards for the electrical network

   BLANK card ending all SOURCE cards

9.Load flow cards for "FIX SOURCE" usage

10.Cards for over-riding the internally calculated initial conditions

11.Output variable specification cards

   BLANK card ending all OUTPUT cards

12.cards for specifying type 1-10 EMTP source functions point by point

13.Batch-mode plotting cards

   BLANK card ending all batch-mode PLOT cards

14.BEGIN NEW DATA CASE

   BLANK

```

Figura 1 - Estrutura Resumida para a Entrada de Dados do ATP

No próximo item serão apresentados todos os conjuntos de informações que constam da Figura 1.

2.1 Dados para iniciar um novo caso

Um caso deve sempre iniciar pelas informações indicadas nos itens 1 e 4 abaixo. Isto deve ser feito de modo a manter-se a padronização exigida pelo programa e para evitar problemas quando há mais de um caso na mesma simulação. Os cartões de comentários podem ser utilizados a critério do usuário, inclusive quanto à sua posição dentro do arquivo, e os cartões especiais dependem do caso sendo processado.

```
1.BEGIN NEW DATA CASE

2.C First of an arbitrary number of comment cards at start
   < < Etc... > >
   C Last of an arbitrary number of comment cards at start

3.Special request cards ( if any )

4.Miscellaneous data cards and extensions
```

A informação do item 1 é sempre um "flag" para o programa quando um caso é interrompido por qualquer problema durante a sua execução. Todo caso deve ser iniciado por esta informação.

Os cartões comentários indicados no item 2 não são obrigatórios e estão aqui apresentados como uma forma de documentação do caso (uma descrição é inserida logo ao início do arquivo). Cartões comentários podem ser incluídos em qualquer ponto do arquivo. A letra C na primeira coluna, seguida de um espaço em branco, é a chave para o programa identificar um cartão comentário. As colunas restantes podem ser utilizadas em sua totalidade para inserir o texto desejado e vários cartões podem ser utilizados para esta finalidade.

Os cartões indicados no item 3 se referem a palavras chave que transferem o processamento para as rotinas que fazem parte do ATP, desviando o processamento do seu seguimento normal, que seria a simulação de um caso de transitórios. Estas informações só aparecem quando se deseja processar uma rotina auxiliar do ATP (LINE CONSTANTS, SATURATION, DATA BASE MODULE, etc...) e não podem aparecer juntamente com uma simulação de um caso de transitórios. Quando uma palavra chave deste tipo é encontrada o restante do arquivo é totalmente diferente do apresentado na Figura 1 e depende de caso para caso.

As informações constantes do item 4 se referem a duas linhas de instruções que são obrigatórias em todos os casos de transitórios. Pode ser que sejam necessários alguns cartões adicionais, dependendo dos parâmetros que foram indicados no segundo cartão de dados miscelâneos.

Com relação às informações deste item pode-se afirmar que apenas os cartões referentes aos itens 1 e 4 seriam essenciais para o processamento de um caso de transitórios.

2.2 Informações sobre a utilização da TACS e da MODELS

As informações constantes nesta parte do arquivo não são obrigatórias e se aplicam somente aos casos onde se está realizando uma simulação para análise transitória de sistemas de controle, juntamente com a rede elétrica ou não.

```
5.TACS HYBRID or TACS STAND ALONE or MODELS  --.
cards that define TACS or MODELS modeling :    |
transfer function blocks, integrators, etc...  =====>  present
                                                only
BLANK card terminating all TACS data          --'  if
                                                TACS or MODELS
                                                usage
```

A rotina TACS permite a modelagem de sistemas de controle contendo componentes com as seguintes características:

- ⇒ funções de transferência
- ⇒ somadores
- ⇒ operações algébricas
- ⇒ operações lógicas
- ⇒ limitadores, etc...

os quais devem ser combinados para formar o sistema de controle desejado. A utilização da TACS é complexa e deve ser objeto de um capítulo a parte.

A rotina MODELS tem a mesma finalidade básica da TACS mas, foi concebida muito recentemente (ainda está sendo desenvolvida) com uma formulação moderna, sendo uma ferramenta mais completa.

Os componentes da rotina MODELS podem ser desenvolvidos em separado e utilizados como se fossem modelos, os quais podem ser constituídos por um único conjunto de componentes ou por mais de um conjunto.

A elaboração dos modelos é auto descritiva, servindo como a sua própria documentação.

No momento não se pode ter no mesmo caso modelos com TACS e MODELS simultaneamente. A exemplo da TACS a sua utilização deve ser objeto de um capítulo a parte.

2.3 Informações sobre os componentes da rede elétrica

As informações constantes desta parte do arquivo são obrigatórias para um caso de simulação de transitórios num sistema elétrico, uma vez que se constituem nos dados que definem a rede elétrica, tais como ramos lineares e não-lineares, transformadores, linhas de transmissão, etc.... Os dados devem ser terminados por um cartão em branco.

```
6.Cards for linear and nonlinear branches, transformers and transmission lines  
  
BLANK card ending all BRANCH cards
```

2.4 Informações sobre alterações topológicas na rede elétrica

As informações constantes desta parte do arquivo correspondem às alterações topológicas na rede elétrica e geralmente fazem parte de um caso de transitórios.

```
7.Cards for electric network switches  
  
BLANK card ending all SWITCH cards
```

As informações geralmente se referem a dados sobre chaves, diodos e tiristores mas, quando o circuito não sofre alterações topológicas (chaveamentos), não há necessidade destas informações.

Um cartão em branco sempre deve fechar este grupo de dados, havendo ou não estes componentes na rede elétrica.

2.5 Informações sobre as fontes de excitação da rede elétrica.

As informações constantes desta parte do arquivo correspondem às fontes de excitação da rede elétrica e geralmente fazem parte de um caso de transitórios.

```
8.Source cards for the electrical network  
  
BLANK card ending all SOURCE cards
```

Os dados correspondem a informações sobre fontes de tensão (ou corrente) e máquinas elétricas e são sempre terminados por um cartão em branco, havendo ou não estes componentes.

2.6 Informações sobre a utilização de fluxo de potência iterativo.

dados para a análise de fluxo de potência na rede elétrica.

2.7 Informações sobre a definição de condições iniciais.

dados para a definição de condições iniciais de tensão e corrente nos componentes da rede elétrica.

2.8 Informações sobre as variáveis selecionadas para a saída do programa.

dados sobre as variáveis selecionadas para a saída do programa sob a forma de tabelas e/ou de gráficos, terminados por um cartão em branco.

2.9 Informações sobre fontes de excitação especiais.

dados para a definição ponto a ponto de determinados tipos de fontes

2.10 Informações sobre saída gráfica.

dados para a especificação de gráficos das variáveis de saída, através da impressora ou de plotadoras contínuas do tipo CALCOMP.

3. Rotinas Auxiliares

Além das informações anteriores deve-se considerar que ainda existem várias rotinas para a obtenção dos parâmetros de determinados componentes no formato requerido pelo ATP. Estas rotinas tem uma estrutura similar à da maioria dos casos, mas as regras particulares de cada uma devem ser respeitadas.

A execução destas rotinas é independente do caso onde os dados serão utilizados para a modelagem dos componentes de rede elétrica.

As seguintes rotinas de suporte estão incluídas no mesmo código ATP:

3.1 XFORMER

rotina para a obtenção dos parâmetros R e L, sob a forma matricial, para a representação de transformadores.

3.2 BCTRAN

rotina para a obtenção dos parâmetros R e L, sob a forma matricial, para a representação de transformadores trifásicos.

3.3 SATURATION

rotina para a obtenção da característica de saturação de transformadores sob a forma $\psi \times i$

3.4 DATA BASE MODULE

rotina para a obtenção de modelos utilizáveis através do comando \$INCLUDE

3.5 HYSTERESIS

rotina para a obtenção da característica magnética de transformadores considerando-se a histerese do núcleo.

3.6 LINE CONSTANTS

programa para o cálculo dos parâmetros de linhas de transmissão.

3.7 CABLE CONSTANTS

programa para o cálculo dos parâmetros de cabos.

3.8 SEMLYEN SETUP

rotina para o cálculo dos parâmetros de uma linha de transmissão, incluindo a dependência com a frequência.

3.9 JMARTI SETUP

rotina para o cálculo dos parâmetros de uma linha de transmissão, incluindo a dependência com a frequência.

4. Formatação dos Dados

Os dados de entrada para cada modelo, ou rotina auxiliar, podem ser fornecidos através da utilização de campos apropriados (definidos para cada componente e conforme as opções de precisão disponíveis) ou de formato livre (quando existente).

A utilização da opção \$INCLUDE permite que os argumentos sejam definidos pelo usuário, alterando substancialmente o formato dos dados de entrada de cada modelo, uma vez que nem todos os parâmetros de entrada necessitam ser explicitados. Esta opção elimina a necessidade de especificação dos parâmetros que sejam internos ao modelo. Por exemplo, uma vez criada uma biblioteca de modelos para um determinado sistema elétrico não há necessidade de outras informações para a montagem do caso, a não ser as barras de conexão de cada componente (ou mesmo de um grupo de componentes).

5. Capacidade do Programa

O programa ATP é dimensionado para uma determinada quantidade de componentes e variáveis da rede elétrica. Há situações onde, eventualmente, o dimensionamento padrão não é suficiente e um redimensionamento se faz necessário.

O usuário pode redimensionar o tamanho de cada uma das listas do programa, conforme as suas necessidades, através do programa VARDIM.

Os valores das listas para o dimensionamento padrão correspondem a 250 barras e 300 ramos. A lista completa de todas as variáveis passíveis de serem modificadas pelos usuários está apresentada na seção 1-G do manual do ATP.

6. Informações Adicionais

6.1. Arquivo de Inicialização

O programa ATP utiliza um arquivo denominado STARTUP onde estão armazenadas todas as variáveis "default" consideradas nos diversos modelos, funções e/ou rotinas. Estas variáveis estão descritas no item 1-E do manual e o arquivo STARTUP pode ser alterado pelo usuário, caso necessário. A finalidade

básica deste arquivo é a padronização de todas as variáveis dependentes do ambiente onde o programa é instalado.

6.2. Comandos do tipo "\$-cards"

Há uma série de comandos do tipo "\$-cards" que podem ser utilizados pelo usuário para a execução de determinada função. Estes cartões são apresentados na seção 1-D do manual do ATP.

Apresentamos a seguir alguns exemplos:

6.2.1 \$VINTAGE,M

tem a finalidade de alterar o formato de leitura de um determinado componente, aumentando a precisão dos parâmetros de entrada.

6.2.2 \$PUNCH

tem a finalidade de descarregar o conteúdo correspondente aos parâmetros necessários à modelagem de um determinado componente num arquivo, a ser posteriormente utilizado na montagem do caso completo.

6.2.3 \$INCLUDE

tem a finalidade de acoplar ao caso em estudo um determinado modelo, já criado anteriormente.

6.2.4 \$UNITS

tem a finalidade de alterar as unidades definidas para XOPT e COPT.

6.2.5 \$DISABLE e \$ENABLE

tem a finalidade de descartar os cartões incluídos entre os dois comandos (passam a ser considerados como cartões de comentários).

6.3. Comandos Especiais

Há mais de 50 comandos especiais que podem ser utilizados num caso de simulação transitória e/ou na execução das rotinas de suporte.

As informações sobre cada um dos comandos especiais estão na seção 2 do manual do ATP.

A seguir são apresentados alguns exemplos:

6.3.1 CABLE CONSTANTS, LINE CONSTANTS

tem a finalidade de acionar a execução das rotinas auxiliares para o cálculo dos parâmetros de cabos ou de linhas de transmissão.

6.3.2 FREQUENCY SCAN

tem a finalidade de acionar a execução da rotina auxiliar que permite a obtenção da impedância da rede em função da frequência.

6.3.4 AVERAGE OUTPUT

tem a finalidade de alterar os valores de saída, calculando o valor médio entre dois pontos consecutivos.

6.3.5 BEGIN PEAK VALUE SEARCH

tem a finalidade de calcular o valor máximo das variáveis especificadas, ignorando-se um determinado intervalo inicial.

6.3.6 OMIT BASE CASE

tem a finalidade de suprimir a simulação preliminar que é realizada nos casos estatísticos.

6.3.7 START AGAIN

tem a finalidade de continuar a simulação de um caso previamente interrompido para ser processado novamente a partir do final da simulação.

Capítulo III

Cálculo de Parâmetros de Linhas de Transmissão

1. Introdução

A grande maioria das simulações geralmente envolve linhas de transmissão como um de seus componentes básicos. Por este motivo, frequentemente é necessário obter os parâmetros das linhas de transmissão que fazem parte do sistema a ser estudado.

Na prática, nem sempre se dispõe de um banco de dados atualizado contendo os parâmetros das linhas de transmissão na forma requerida e uma das maneiras mais eficientes é realizar os cálculos antes de se iniciarem as simulações.

O programa ATP dispõe de uma rotina para o cálculo dos parâmetros de linhas de transmissão, própria para a utilização que se necessita realizar em estudos de transitórios ou de indução em linhas paralelas ou em objetos próximos.

A rotina permite o cálculo dos parâmetros de configurações arbitrárias de cabos de uma ou mais linhas de transmissão na mesma faixa de passagem, além da obtenção de modelos especiais para serem introduzidos a posteriori nas simulações de transitórios.

Nos próximos itens será apresentada uma explicação sobre a parte inicial do capítulo do ATP Rule Book que versa sobre o cálculo de parâmetros de linhas de transmissão. O programa também contém uma rotina para o cálculo de parâmetros de cabos subterrâneos, a qual não será apresentada porque a simulação de cabos subterrâneos geralmente envolve estudos mais complexos, fugindo ao escopo do presente material, basicamente dirigido a iniciantes na utilização do ATP.

2. Finalidade e Aplicações

A rotina de suporte "LINE CONSTANTS" pode ser utilizada nas seguintes circunstâncias:

⇒ "LINE CONSTANTS" isolada

esta opção pode ser utilizada para calcular as matrizes de resistências, indutâncias e capacitâncias, em componentes simétricas ou de fase, de qualquer configuração arbitrária de condutores aéreos, para qualquer frequência entre 0.0001Hz e 500 kHz.

⇒ "LINE CONSTANTS" incluindo a solicitação de acoplamento mútuo

esta opção pode ser utilizada para calcular o acoplamento entre uma linha de transmissão e um circuito de comunicação paralelo.

⇒ Cálculo de parâmetros para uma faixa de frequências

esta opção pode ser usada para a obtenção das resistências, indutâncias e capacitâncias para uma faixa de frequências pré-estabelecida, com valores espaçados de forma logarítmica.

⇒ Solicitação de saída para um π -equivalente

esta opção pode ser usada para a obtenção de um π -equivalente nominal (ou equivalente para linha de transmissão curta, válido para simulação de transitórios) ou para um π -equivalente de uma linha de transmissão longa (válido para simular o comportamento de uma linha de transmissão longa em regime permanente somente).

⇒ Solicitação de modelo K.C. Lee ou Clarke

esta opção pode ser usada para obter um modelo de linha de transmissão (transposta ou não) a parâmetros para uma determinada frequência, adequado para propagação de ondas.

⇒ Modelo JMARTI

esta opção pode ser usada para a obtenção de um modelo de uma linha de transmissão com os seus parâmetros variando com a frequência, adequado para estudos de transitórios onde o modelo usual a parâmetros constantes não é adequado. Na prática, esta opção não é exatamente um caso de cálculo de parâmetros de linhas de transmissão, sendo mais especificamente uma outra rotina auxiliar do ATP, mas que utiliza a rotina LINE CONSTANTS internamente.

Neste capítulo será apresentada somente a opção inicial da rotina "LINE CONSTANTS", que é a alternativa que tem por finalidade calcular as matrizes, em componentes simétricas ou de fase, das resistências, indutâncias e capacitâncias de uma configuração arbitrária de cabos aéreos, de uma ou mais linhas de transmissão.

3. Montagem de um caso de "LINE CONSTANTS" isolado

3.1 Estrutura do arquivo

Um arquivo para um caso de utilização da rotina "LINE CONSTANTS" para o cálculo das matrizes de componentes simétricas e/ou de fase de uma linha de transmissão tem a seguinte estrutura básica:

```

BEGIN NEW DATA CASE
LINE CONSTANTS
ENGLISH or METRIC
Conductors Cards
BLANK Card Ending Conductors Cards
Frequency Cards
BLANK Card Ending Frequency Cards
BLANK Card Ending Line Constants Routine
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK Card Ending All ATP Cases
    
```

3.2 Informação Inicial

```

-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----+-----8
BEGIN NEW DATA CASE
    
```

Instrução opcional utilizada em todo início de arquivo do ATP para sinalizar o início de um novo caso (item II-A do ATP Rule Book). Mesmo sendo um caso de "LINE CONSTANTS" esta instrução deve ser utilizada porque a rotina sendo utilizada, a exemplo de várias outras, está embutida no programa ATP. A sua utilização é, portanto, como se fosse a utilização do ATP. A diferença básica é que nenhuma rotina pode ser utilizada embutida dentro de um caso de transitórios, por exemplo.

3.3 Instrução Especial para Acionar a Rotina de Cálculo de Parâmetros

```

-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----+-----8
LINE CONSTANTS
    
```

A instrução acima é uma palavra-chave para transferir o processamento do programa principal para a rotina auxiliar que realiza o cálculo de parâmetros de linhas de transmissão.

3.4 Instruções Especiais para Definição das Unidades

```
-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
METRIC
ENGLISH
```

As instruções acima são opcionais e servem para definir se a rotina utilizará para efeito de entrada e saída de dados unidades métricas ou inglesas. A opção "default" é sempre em unidades inglesas.

3.5 Dados Referentes aos Condutores

Devem constar tantas instruções referentes aos dados dos condutores quantos forem os condutores, ou quantos forem os conjuntos de cabos geminados, dependendo da opção para entrada de dados. Há duas possibilidades:

- ⇒ uma instrução para cada condutor, mesmo que sejam geminados
- ⇒ uma instrução para cada conjunto de cabos geminados.

Devem ser indicados os dados físicos referentes à geometria da linha de transmissão (posição geométrica de cada condutor), como também as informações referentes aos próprios condutores (relação T/D, resistência DC, etc...).

Deve ser usada uma instrução de um dos tipos acima indicados para cada condutor físico ou para cada conjunto de cabos geminados, considerando que alguns campos das instruções tem significados diferentes, conforme a opção selecionada para a definição física dos condutores.

Quando a opção utilizada é a que se refere a cada condutor individual, independentemente de pertencerem a um conjunto geminado de configuração regular ou irregular, é necessário tratar cada um com uma instrução individual contendo os dados referentes a cada condutor.

Quando a opção utilizada é a que se refere a um conjunto de cabos geminados que ocupam uma configuração regular (cabos idênticos espaçados uniformemente ao redor de uma circunferência), a alternativa denominada "automatic bundling option" deve ser a utilizada porque facilita a entrada dos dados. Esta opção implica numa quantidade menor de instruções, sendo necessário apenas uma instrução para cada fase da linha de transmissão (sem levar em conta os cabos pára-raios).

Não é necessário uma ordem específica para associar a posição física relativa dos cabos com as fases da linha de transmissão e com a sequência de entrada dos dados. Os cabos são identificados pela numeração que o usuário atribuir e todos os cabos individuais com o mesmo número serão considerados pertencentes a mesma fase .

Geralmente os seguintes campos tem sempre a mesma significação em quase todos os casos de utilização da rotina "LINE CONSTANTS" :

⇒ SKIN= T/D

⇒ RESIS= Resistência CC

⇒ IX=4

⇒ REACT=BLANK

3.5.1 Alternativa para Condutores Individuais

No caso de se utilizar a opção para entrada de dados considerando condutores individuais, o seguinte formato se aplica:

										1										2										3										4										5										6										7										8									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0										
I3	F5.4	F8.5	I2	F8.5	F8.5	F8.3	F8.3	F8.3																																																																																	
IP	SKIN	RESIS	IX	REACT	DIAM	HORIZ	VTOWER	VMID																																																																																	
metric		ohms/km		veja	veja	cm	m	m																																																																																	
english		ohms/mile		abaixo	abaixo	inch	feet	feet																																																																																	

Neste caso, todas as variáveis se referem a cada condutor individual, independentemente de pertencerem a um conjunto de cabos geminados ou não.

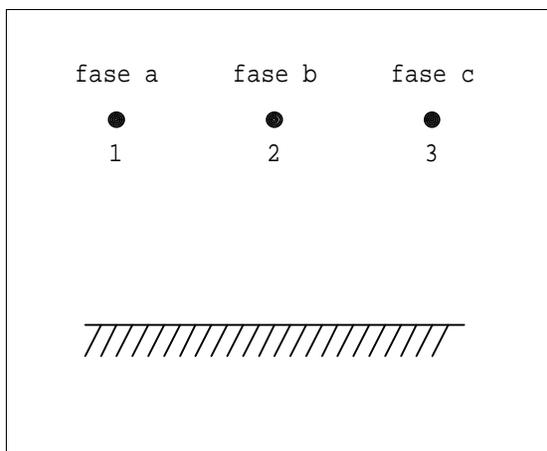


Figura 1 . Configuração com 1 Cabo/fase

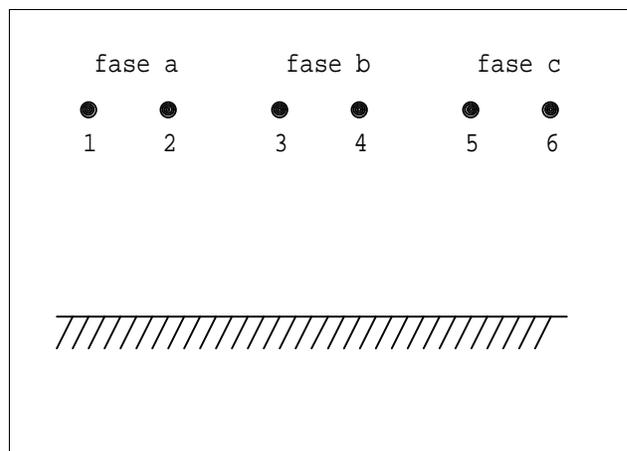


Figura 2 . Configuração com 2 Cabos/fase

Na figura 1 estão indicados os 3 cabos das 3 fases de uma linha de transmissão. Na opção para condutores individuais são necessárias 3 instruções para os condutores da linha em questão.

Na Figura 2 estão indicados os 6 cabos das 3 fases de uma linha de transmissão (que utiliza 2 cabos geminados por fase). Na opção para condutores individuais são necessárias 6 instruções. Os parâmetros tem o seguinte significado:

⇒ IP - número de fase do condutor

todos os condutores com o mesmo número de fase serão considerados pertencentes a um conjunto de cabos geminados e substituídos por um único condutor equivalente.

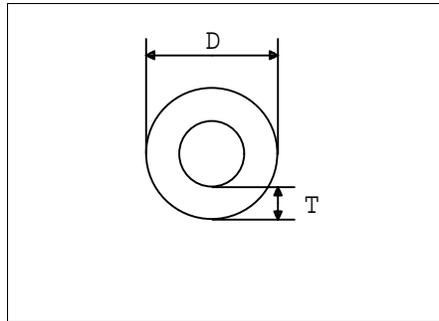
a numeração deve ser **1,2,3,...etc..** para as fases e **0** para os cabos pára-raios.

⇒ SKIN - "flag" para identificar a inclusão do efeito skin, associada ao parâmetro RESIS.

⇒ RESIS - resistência do condutor associada ao efeito skin

para não incluir o efeito skin, o parâmetro SKIN deve ser igual a **0.0** e o parâmetro RESIS deve ser igual ao valor da resistência CA do condutor em ohm/km(METRIC) ou ohm/mi(ENGLISH).

para incluir o efeito skin, o parâmetro SKIN deve ser igual a relação **T/D** do condutor, sendo **T** a espessura do condutor tubular e **D** o diâmetro externo do condutor, e o parâmetro RESIS deve ser igual ao valor da resistência CC do condutor.



No caso de condutores sólidos a relação T/D é igual a **0.5** porque **T** é igual ao raio do condutor.

⇒ **IX** - é um "flag" para a indutância própria do condutor, estando associado ao parâmetro **REACT**

⇒ **REACT** - é um parâmetro que depende do "flag" **IX** e que define o tipo de cálculo que será realizado para a obtenção da reatância do condutor. O valor de **REACT** pode assumir as seguintes condições, dependendo do valor de **IX**:

IX = 0 , deve ser especificado para **REACT** o valor da reatância do condutor (em ohm/km ou ohm/milha) para uma unidade de espaçamento (m ou foot), dependendo da opção escolhida (metric ou english), o qual será válido para a frequência especificada. A indutância interna não é corrigida para o efeito "skin".

IX = 1 , deve ser especificado para **REACT** o valor da reatância do condutor (em ohm/km ou ohm/milha) para uma unidade de espaçamento (m ou foot), dependendo da opção escolhida (metric ou english), para a frequência de 60 Hz. Caso uma outra frequência seja especificada pelo usuário, a reatância será corrigida proporcionalmente. A indutância interna não é corrigida para o efeito "skin".

IX = 2 , deve ser especificado para **REACT** o valor do raio médio geométrico do condutor (**GMR**), em cm ou polegadas, dependendo da opção escolhida para as unidades. A indutância interna não é corrigida para o efeito "skin".

IX = 3 , deve ser especificado para **REACT** o valor da relação **GMR/R**. A indutância interna não é corrigida para o efeito "skin". A relação **GMR/R** é igual a **0.7788** para um condutor sólido.

IX = 4 , **REACT** não deve ser especificado e o campo deve ser deixado em branco. A indutância interna será corrigida para o efeito "skin" e o cálculo da indutância própria será baseado na geometria tubular do condutor. Esta é a opção mais utilizada normalmente.

⇒ **DIAM** - é o diâmetro externo do condutor tubular, em cm ou polegada, dependendo das unidades definidas pelo usuário (metric ou english).

⇒ **HORIZ** - é a distância horizontal, em m ou "foot" (dependendo da opção metric ou english), entre o centro do condutor, ou do conjunto de condutores geminados, e uma referência especificada pelo usuário. A mesma referência deve ser usada para todos os condutores no mesmo caso sendo processado. Geralmente se utiliza o centro da configuração da linha de transmissão como referência para facilitar a entrada de dados (as abcissas dos condutores serão simétricas em relação à referência e um dos cabos terá abcissa zero, com exceção de configurações com mais de uma linha de transmissão).

⇒ **VTOWER** - é a altura vertical do centro do condutor, ou do conjunto de cabos geminados, em m ou "foot" (dependendo da opção metric ou english), medida na torre e a partir do solo.

⇒ **VMID** - é a altura vertical do centro do condutor, ou do conjunto de cabos geminados, em m ou "foot" (dependendo da opção metric ou english), medida no meio do vão e a partir do solo.

Nota 1 : Quando os valores de **VTOWER** e **VMID** são especificados, a altura equivalente dos condutores, a ser utilizada nos cálculos dos parâmetros da linha de transmissão, é calculada pela seguinte expressão:

$$V_{eq} = 2/3 VMID + 1/3 VTOWER$$

Nota 2 : Quando somente um dos dois parâmetros (**VMID** ou **VTOWER**) é especificado, a altura equivalente é considerada igual ao valor do parâmetro especificado. Portanto, quando a altura equivalente dos condutores já é conhecida é necessário especificar somente um dos dois parâmetros **VMID** ou **VTOWER**.

3.5.2 Alternativa para Redução Automática dos Condutores Geminados

No caso de utilização da opção que considera os condutores equivalentes do conjunto de cabos geminados, os seguintes formatos devem ser considerados:

		1			2			3			4			5			6			7			8						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
I3	F5.4	F8.5			I2	F8.5	F8.5	F8.3	F8.3	F8.3	F8.5	F6.2				I2													
IP	SKIN	RESIS			IX	REACT	DIAM	HORIZ	VTOWER	VMID	SEPAR	ALPHA				NB													
metric	ohms/km			veja abaixo			veja abaixo	cm	m	m	cm	degree																	
english	ohms/mile			veja abaixo			veja abaixo	inch	feet	feet	feet	degree																	

Observações importantes:

- ⇒ Neste caso, as variáveis **SKIN**, **RESIS**, **IX**, **REACT** e **DIAM** se aplicam a um dos condutores que formam o conjunto de condutores geminados. Todos os outros condutores do conjunto são assumidos com as mesmas características.
- ⇒ As variáveis **HORIZ**, **VTOWER** e **VMID** se aplicam à posição do centro geométrico do conjunto de condutores com relação ao solo.
- ⇒ As variáveis **SEPAR**, **ALPHA** e **NBUND** descrevem a geometria do conjunto de cabos geminados.

As seguintes informações se aplicam aos parâmetros dos condutores nesta opção:

- ⇒ IP - número de fase do condutor equivalente

na entrada de dados todos os condutores pertencentes a um conjunto de cabos geminados são substituídos por um único condutor fictício por fase.

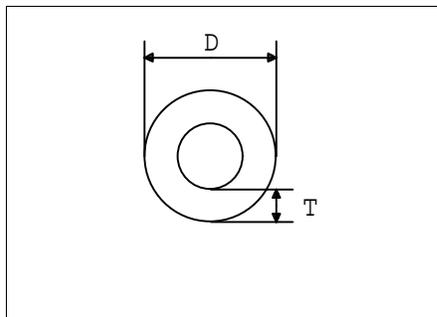
a numeração deve ser **1,2,3,...etc..** para as fases e **0** para os cabos pára-raios.

- ⇒ SKIN - "flag" para identificar a inclusão do efeito skin, associada ao parâmetro **RESIS**.
- ⇒ RESIS - resistência do condutor associada ao efeito skin

para não incluir o efeito skin, o parâmetro **SKIN** deve ser igual a **0.0** e o parâmetro **RESIS** deve ser igual ao valor da resistência CA do condutor em ohm/km(METRIC) ou ohm/mi(ENGLISH).

para incluir o efeito skin, o parâmetro **SKIN** deve ser igual a relação **T/D** do condutor, sendo **T** a espessura do condutor tubular e **D** o diâmetro externo do condutor, e o parâmetro RESIS deve ser igual ao valor da resistência CC do condutor.

No caso de condutores sólidos a relação **T/D** é igual a **0.5** porque **T** é igual ao raio do condutor.



⇒ **IX** - é um "flag" para a indutância própria do condutor, estando associado ao parâmetro **REACT**

⇒ **REACT** - é um parâmetro que depende do "flag" **IX** e que define o tipo de cálculo que será realizado para a obtenção da reatância do condutor. O valor de **REACT** pode assumir as seguintes condições, dependendo do valor de **IX**:

IX = 0 , deve ser especificado para **REACT** o valor da reatância de um único condutor, do conjunto de cabos geminados, em ohm/km ou ohm/milha, para uma unidade de espaçamento (m ou foot), dependendo da opção escolhida (metric ou english), o qual será válido para a frequência especificada. A indutância interna não é corrigida para o efeito "skin".

IX = 1 , deve ser especificado para **REACT** o valor da reatância de um único condutor, do conjunto de condutores geminados, em ohm/km ou ohm/milha, para uma unidade de espaçamento (m ou foot), dependendo da opção escolhida (metric ou english), para a frequência de 60 Hz. Caso uma outra frequência seja especificada pelo usuário, a reatância será corrigida proporcionalmente. A indutância interna não é corrigida para o efeito "skin".

IX = 2 , deve ser especificado para **REACT** o valor do raio médio geométrico (GMR) de um único condutor, do conjunto de condutores geminados, em cm ou polegadas, dependendo da opção escolhida para as unidades. A indutância interna não é corrigida para o efeito "skin".

IX = 3 , deve ser especificado para **REACT** o valor da relação **GMR/R** de um único condutor do conjunto de condutores geminados. A indutância interna não é corrigida para o efeito "skin". A relação **GMR/R** é igual a **0.7788** para um condutor sólido.

IX = 4 , **REACT** não deve ser especificado e o campo deve ser deixado em branco. A indutância interna será corrigida para o efeito "skin" e o cálculo da indutância própria será baseado na geometria tubular do condutor. Esta é a opção mais utilizada normalmente.

⇒ **DIAM** - é o diâmetro externo de um dos condutores do conjunto de condutores geminados, em cm ou polegada, dependendo das unidades definidas pelo usuário (metric ou english).

⇒ **HORIZ** - é a distância horizontal, em m ou "foot" (dependendo da opção metric ou english), entre o centro do conjunto de condutores geminados e uma referência especificada pelo usuário. A mesma referência deve ser usada para todos os condutores no mesmo caso sendo processado. Geralmente se utiliza o centro da configuração da linha de transmissão como referência para facilitar a entrada de dados (as abcissas dos condutores serão simétricas em relação à referência e um dos cabos terá abcissa zero, com exceção de configurações com mais de uma linha de transmissão).

⇒ **VTOWER** - é a altura vertical do centro do conjunto de condutores geminados, em m ou "foot" (dependendo da opção metric ou english), medida na torre e a partir do solo.

⇒ **VMID** - é a altura vertical do centro do conjunto de condutores geminados, em m ou "foot" (dependendo da opção metric ou english), medida no meio do vão e a partir do solo.

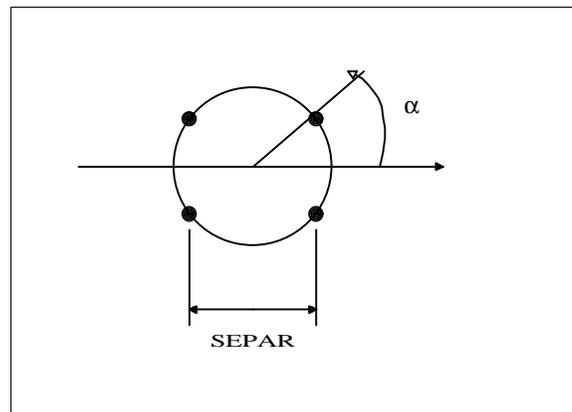
Nota 1 : Quando os valores de **VTOWER** e **VMID** são especificados, a altura equivalente dos condutores, a ser utilizada nos cálculos dos parâmetros da linha de transmissão, é calculada pela seguinte expressão:

$$V_{eq} = 2/3 VMID + 1/3 VTOWER$$

Nota 2 : Quando somente um dos dois parâmetros (**VMID** ou **VTOWER**) é especificado, a altura equivalente é considerada igual ao valor do parâmetro especificado. Portanto, quando a altura equivalente dos condutores já é conhecida é necessário especificar somente um dos dois parâmetros **VMID** ou **VTOWER**.

⇒ **SEPAR** - é a distância de separação, em cm ou polegada, entre os centros de dois condutores adjacentes de um conjunto de condutores geminados.

⇒ **ALPHA** - é a posição angular do centro de um dos condutores do conjunto de condutores geminados em relação ao eixo horizontal, que é tomado como referência. Os ângulos positivos são definidos no sentido anti-horário.



⇒ **NBUND** - é o número de condutores que fazem parte de um conjunto de cabos geminados.

3.6 Instruções Referentes à Frequência

Após as informações sobre os condutores devem seguir as informações sobre a frequência, ou frequências, resistividade do solo, tipo de correção de Carson e modos de impressão das matrizes dos parâmetros da linha de transmissão.

1									2									3									4									5									6									7									8								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0		
F 8.2									F 10.2									A 10									6 1 1									6 1 1									ICAP 11									ISEG 11																	
RHO									FREQ									FCAR									ICPR									IZPR																																			

O formato indicado acima é o que deve ser seguido para a entrada de dados dos parâmetros relativos a este grupo de informações.

⇒ RHO - é a resistividade em ohm.metro do solo homogêneo, conforme a teoria de Carson.

⇒ FREQ - é a frequência em Hz na qual os parâmetros da linha de transmissão serão calculados.

⇒ FCAR - é um "flag" usado para controlar a quantidade de termos na fórmula de Carson que corrige a impedância considerando o retorno pelo solo.

= 0 - nenhuma parcela é acrescentada para considerar o retorno pelo solo.

= 1 na coluna 28 - os cálculos são efetuados com a máxima precisão, considerando todos os termos da fórmula de Carson

= branco - os cálculos são efetuados com a máxima precisão, considerando todos os termos da fórmula de Carson

Atenção : o programa **ATP** usa verificação de caracteres neste campo. Consequentemente, a interpretação de **0** ou **branco** é diferente, ao contrário do resto do programa, onde **0** e **branco** costumam ter o mesmo significado.

⇒ ICPR - é um "flag" para controlar o tipo de impressão para a matriz de capacitâncias da linha de transmissão, associado ao parametro **ICAP**.

⇒ ICAP - é um "flag" para controlar o tipo de matriz que deverá ser impressa para a matriz de capacitância da linha de transmissão, associado ao parametro **ICPR**.

Há duas opções básicas para o parametro **ICAP** : **0** ou **1**. Dependendo da opção selecionada e do valor de **ICPR** as seguintes matrizes de capacitâncias são impressas:

Para **ICAP** = 0 :

ICAP	ICPR	Matriz Impressa
0	100000	inversa de ω [C]
0	010000	inversa de ω [Ce]
0	001000	inversa de ω [C s]
0	000100	ω [C]
0	000010	ω [Ce]
0	000001	ω [Cs]

Para **ICAP** = 1 :

ICAP	ICPR	Matriz Impressa
1	100000	inversa de [C]
1	010000	inversa de [Ce]
1	001000	inversa de [C s]
1	000100	[C]
1	000010	[Ce]
1	000001	[Cs]

A nomenclatura utilizada nas tabelas tem o seguinte significado:

[C] significa que a matriz de capacitâncias é para o conjunto completo de cabos da linha de transmissão, sem nenhuma redução, incluindo todos os cabos físicos (fases e pára-raios).

[Ce] significa que a matriz de capacitâncias é para o conjunto de fases da linha de transmissão, depois da eliminação dos cabos geminados e dos pára-raios.

[Cs] significa que a matriz de capacitâncias se encontra em componentes simétricas e para o conjunto de fases da linha de transmissão, depois da eliminação dos cabos geminados e dos pára-raios.

⇒ DIST - este parametro geralmente não tem nenhuma utilidade, uma vez que todos os valores são expressos em unidades de comprimento. Exceção deve ser feita ao caso onde se deseja calcular um π -equivalente porque, neste caso, seria necessário especificar o seu comprimento.

⇒ IZPR - é um parametro para controlar a impressão dos vários tipos das matrizes de impedâncias da linha de transmissão, com a seguinte correspondência:

IZPR	Matriz Impressa
1	[Z]
010000	[Ze]
001000	[Zs]
000100	inversa de [Z]
000010	inversa de [Ze]
000001	inversa de [Zs]

⇒ ISEG - é um "flag" usado para indicar se os cabos pára-raios são contínuos ou segmentados.

ISEG = 0 - pára-raios contínuos

ISEG = 1 - pára-raios segmentados

3.7 Instruções para Terminação do Caso

```

-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----+-----8
BLANK
BLANK
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
    
```

As informações indicadas acima tem a seguinte finalidade :

⇒ o primeiro cartão com a palavra **BLANK** serve para terminar todos as informações de frequência.

⇒ o segundo cartão com a palavra **BLANK** serve para indicar o término de todos os casos de **LINE CONSTANTS**.

⇒ o cartão com **BEGIN NEW DATA CASE** serve para sinalizar o final de um caso ou início de um outro.

⇒ o último cartão com a palavra **BLANK** serve para encerrar todos os casos de **ATP**.

4. Caso Exemplo

Com o objetivo de mostrar um caso prático, considere a configuração indicada na Figura 3.

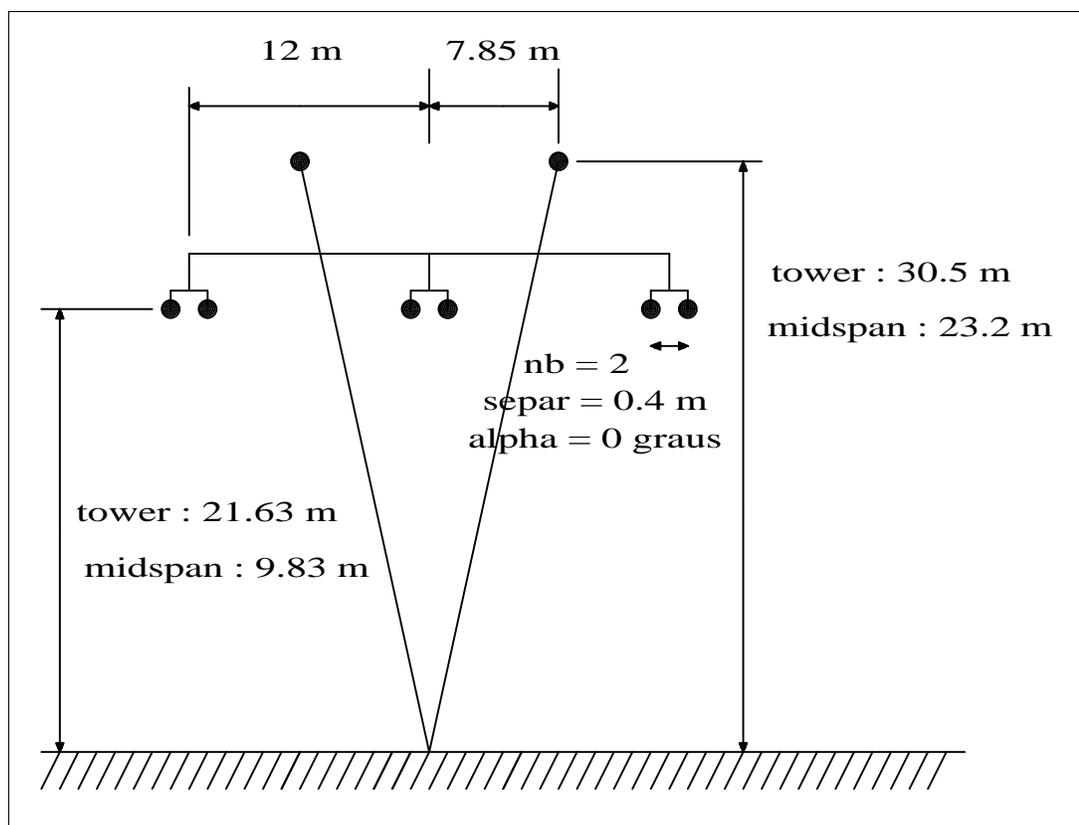


Figura 3 - Configuração de uma Linha de Transmissão de 400 kV

Os condutores de fase são cabos tubulares com as seguintes características:

$$T/D = 0.231$$

$$\text{Resistência CC} = 0.0522 \text{ ohms/km}$$

$$\text{Diâmetro externo} = 3.18 \text{ cm}$$

Os cabos pára-raios são sólidos com as seguintes características:

$$T/D = 0.5$$

$$\text{Resistência CC} = 0.36 \text{ ohms/km}$$

$$\text{Diâmetro externo} = 1.46 \text{ cm}$$

A resistividade do solo é igual a 250.0 ohm.metro e a frequência para cálculo dos parametros é 50 Hz.

Com base nos dados indicados acima é possível montar o seguinte arquivo para entrada no ATP:

Table Row	Phase Number	Skin effect R-type	Resistance R (ohm/km)	Reactance data specification X-type	X(ohm/km) or GMR	Diameter (cm)	Horizontal X (mtrs)	Avg height Y (mtrs)	Name
1	1	0.23100	0.05220	4	0.000000	3.18000	-12.200	13.763	
2	2	0.23100	0.05220	4	0.000000	3.18000	-0.200	13.763	
3	3	0.23100	0.05220	4	0.000000	3.18000	11.800	13.763	
4	1	0.23100	0.05220	4	0.000000	3.18000	-11.800	13.763	
5	2	0.23100	0.05220	4	0.000000	3.18000	0.200	13.763	
6	3	0.23100	0.05220	4	0.000000	3.18000	12.200	13.763	
7	0	0.50000	0.36000	4	0.000000	1.46000	-7.850	25.633	
8	0	0.50000	0.36000	4	0.000000	1.46000	7.850	25.633	

Matrices are for earth resistivity = 2.50000000E+02 ohm-meters and frequency 5.00000000E+01 Hz. Correction factor = 1.00000000E-06

Capacitance matrix, in units of [farads/kmeter] for the system of physical conductors.
Rows and columns proceed in the same order as the sorted input.

```

1  1.111559E-08
2 -3.147100E-10  1.117769E-08
3 -8.122125E-11 -3.112124E-10  1.113194E-08
4 -6.126836E-09 -3.580533E-10 -8.851474E-11  1.113194E-08
5 -2.747274E-10 -6.073371E-09 -3.580533E-10 -3.112124E-10  1.117769E-08
6 -7.479889E-11 -2.747274E-10 -6.126836E-09 -8.122125E-11 -3.147100E-10  1.111559E-08
7 -5.302347E-10 -4.257381E-10 -2.002942E-10 -5.390157E-10 -4.007901E-10 -1.904813E-10  6.641598E-09
8 -1.904813E-10 -4.007901E-10 -5.390157E-10 -2.002942E-10 -4.257381E-10 -5.302347E-10 -6.955842E-10  6.641598E-09

```

Capacitance matrix, in units of [farads/kmeter] for the system of equivalent phase conductors.
Rows and columns proceed in the same order as the sorted input.

```

1  9.993860E-09
2 -1.258703E-09  1.020865E-08
3 -3.257561E-10 -1.258703E-09  9.993860E-09

```

Capacitance matrix, in units of [farads/kmeter] for symmetrical components of the equivalent phase conductor
Rows proceed in the sequence (0, 1, 2), (0, 1, 2), etc.; columns proceed in the sequence (0, 2, 1), (0, 2, 1), etc.

```

0  8.170014E-09
   0.000000E+00
1  1.196931E-10 -3.467804E-10
   -2.073145E-10 -6.006413E-10
2  1.196931E-10  1.101318E-08 -3.467804E-10
   2.073145E-10  2.141609E-25  6.006413E-10

```

Impedance matrix, in units of [ohms/kmeter] for the system of physical conductors.
Rows and columns proceed in the same order as the sorted input.

```

1  1.010003E-01
   7.289516E-01
2  4.836230E-02  1.010003E-01
   3.032619E-01  7.289516E-01
3  4.834523E-02  4.836230E-02  1.010003E-01
   2.597141E-01  3.032619E-01  7.289516E-01
4  4.836809E-02  4.836268E-02  4.834597E-02  1.010003E-01
   5.169645E-01  3.053919E-01  2.607700E-01  7.289516E-01
5  4.836191E-02  4.836809E-02  4.836268E-02  4.836230E-02  1.010003E-01
   3.012017E-01  5.169645E-01  3.053919E-01  3.032619E-01  7.289516E-01
6  4.834447E-02  4.836191E-02  4.836809E-02  4.834523E-02  4.836230E-02  1.010003E-01
   2.586757E-01  3.012017E-01  5.169645E-01  2.597141E-01  3.032619E-01  7.289516E-01
7  4.796546E-02  4.796403E-02  4.795231E-02  4.796558E-02  4.796380E-02  4.795174E-02  4.078027E-01
   3.004204E-01  2.934663E-01  2.629385E-01  3.010798E-01  2.924923E-01  2.620060E-01  7.850868E-01
8  4.795174E-02  4.796380E-02  4.796558E-02  4.795231E-02  4.796403E-02  4.796546E-02  4.756628E-02  4.078027E-01
   2.620060E-01  2.924923E-01  3.010798E-01  2.629385E-01  2.934663E-01  3.004204E-01  2.872422E-01  7.850868E-01

```

Impedance matrix, in units of [ohms/kmeter] for the system of equivalent phase conductors.
Rows and columns proceed in the same order as the sorted input.

```

1  8.437393E-02
   4.821768E-01
2  5.863546E-02  8.633031E-02
   1.580488E-01  4.720861E-01
3  5.663409E-02  5.863546E-02  8.437393E-02
   1.208911E-01  1.580488E-01  4.821768E-01

```

Impedance matrix, in units of [ohms/kmeter] for symmetrical components of the equivalent phase conductor
 Rows proceed in the sequence (0, 1, 2), (0, 1, 2), etc.; columns proceed in the sequence (0, 2, 1), (0, 2, 1), etc.

```

0  2.009627E-01
   7.701390E-01

1 -8.473189E-03 -2.402486E-02
   -3.368656E-03  1.465841E-02

2  7.153936E-03  2.705772E-02  2.470698E-02
   -5.653669E-03  3.331504E-01  1.347694E-02
    
```

Sequence	Surge impedance magnitude(ohm) angle(degr.)	Attenuation db/km	velocity km/sec	Wavelength km	Resistance ohm/km	Reactance ohm/km	Susceptance mho/km
Zero :	5.56866E+02 -7.31242E+00	1.58014E-03	2.21602E+05	4.43204E+03	2.00963E-01	7.70139E-01	2.56669E-06
Positive:	3.10816E+02 -2.32162E+00	3.78381E-04	2.92376E+05	5.84751E+03	2.70577E-02	3.33150E-01	3.45989E-06

Blank card terminating frequency cards.

BLANK CARD ENDING FREQUENCY CARDS													
C SEGUNDO CASO - DADOS PARA CADA FASE DA LINHA DE TRANSMISSAO													
Line conductor card.	2.310E-01	5.220E-02	4	10.231	0.0522	4	3.18	-12.0	21.63	9.83	40.	0.0	2
Line conductor card.	2.310E-01	5.220E-02	4	20.231	0.0522	4	3.18	0.0	21.63	9.83	40.	0.0	2
Line conductor card.	2.310E-01	5.220E-02	4	30.231	0.0522	4	3.18	12.0	21.63	9.83	40.	0.0	2
Line conductor card.	5.000E-01	3.600E-01	4	00.5	0.36	4	1.46	-7.85	30.50	23.2			
Line conductor card.	5.000E-01	3.600E-01	4	00.5	0.36	4	1.46	7.85	30.50	23.2			

Blank card terminating conductor cards.

BLANK CARD ENDING CONDUCTOR CARDS													
Frequency card.	2.500E+02	5.000E+01	0.000E+00	250.0	50.0	1	111	111	1				

Line conductor table after sorting and initial processing.

Table Row	Phase Number	Skin effect R-type	Resistance R (ohm/km)	Reactance data specification X-type	X(ohm/km) or GMR	Diameter (cm)	Horizontal X (mtrs)	Avg height Y (mtrs)	Name
1	1	0.23100	0.05220	4	0.000000	3.18000	-12.200	13.763	
2	2	0.23100	0.05220	4	0.000000	3.18000	-0.200	13.763	
3	3	0.23100	0.05220	4	0.000000	3.18000	11.800	13.763	
4	1	0.23100	0.05220	4	0.000000	3.18000	-11.800	13.763	
5	2	0.23100	0.05220	4	0.000000	3.18000	0.200	13.763	
6	3	0.23100	0.05220	4	0.000000	3.18000	12.200	13.763	
7	0	0.50000	0.36000	4	0.000000	1.46000	-7.850	25.633	
8	0	0.50000	0.36000	4	0.000000	1.46000	7.850	25.633	

Matrices are for earth resistivity = 2.50000000E+02 ohm-meters and frequency 5.00000000E+01 Hz. Correction factor = 1.00000000E-06

Capacitance matrix, in units of [farads/kmeter] for the system of physical conductors.
 Rows and columns proceed in the same order as the sorted input.

```

1  1.111559E-08

2 -3.147100E-10  1.117769E-08

3 -8.122125E-11 -3.112124E-10  1.113194E-08

4 -6.126836E-09 -3.580533E-10 -8.851474E-11  1.113194E-08

5 -2.747274E-10 -6.073371E-09 -3.580533E-10 -3.112124E-10  1.117769E-08

6 -7.479889E-11 -2.747274E-10 -6.126836E-09 -8.122125E-11 -3.147100E-10  1.111559E-08

7 -5.302347E-10 -4.257381E-10 -2.002942E-10 -5.390157E-10 -4.007901E-10 -1.904813E-10  6.641598E-09

8 -1.904813E-10 -4.007901E-10 -5.390157E-10 -2.002942E-10 -4.257381E-10 -5.302347E-10 -6.955842E-10  6.641598E-09
    
```

Capacitance matrix, in units of [farads/kmeter] for the system of equivalent phase conductors.
 Rows and columns proceed in the same order as the sorted input.

```

1  9.993860E-09

2 -1.258703E-09  1.020865E-08

3 -3.257561E-10 -1.258703E-09  9.993860E-09
    
```

Capacitance matrix, in units of [farads/kmeter] for symmetrical components of the equivalent phase conductor
 Rows proceed in the sequence (0, 1, 2), (0, 1, 2), etc.; columns proceed in the sequence (0, 2, 1), (0, 2, 1), etc.

```

0  8.170014E-09
   0.000000E+00

1  1.196931E-10 -3.467804E-10
   -2.073145E-10 -6.006413E-10

2  1.196931E-10  1.101318E-08 -3.467804E-10
   2.073145E-10  2.141609E-25  6.006413E-10
    
```

Impedance matrix, in units of [ohms/kmeter] for the system of physical conductors.
 Rows and columns proceed in the same order as the sorted input.

```

1  1.010003E-01
   7.289516E-01

2  4.836230E-02  1.010003E-01
   3.032619E-01  7.289516E-01

3  4.834523E-02  4.836230E-02  1.010003E-01
   2.597141E-01  3.032619E-01  7.289516E-01

4  4.836809E-02  4.836268E-02  4.834597E-02  1.010003E-01
   5.169645E-01  3.053919E-01  2.607700E-01  7.289516E-01

5  4.836191E-02  4.836809E-02  4.836268E-02  4.836230E-02  1.010003E-01
   3.012017E-01  5.169645E-01  3.053919E-01  3.032619E-01  7.289516E-01

6  4.834447E-02  4.836191E-02  4.836809E-02  4.834523E-02  4.836230E-02  1.010003E-01
   2.586757E-01  3.012017E-01  5.169645E-01  2.597141E-01  3.032619E-01  7.289516E-01

7  4.796546E-02  4.796403E-02  4.795231E-02  4.796558E-02  4.796380E-02  4.795174E-02  4.078027E-01
   3.004204E-01  2.934663E-01  2.629385E-01  3.010798E-01  2.924923E-01  2.620060E-01  7.850868E-01

8  4.795174E-02  4.796380E-02  4.796558E-02  4.795231E-02  4.796403E-02  4.796546E-02  4.756628E-02  4.078027E-01
   2.620060E-01  2.924923E-01  3.010798E-01  2.629385E-01  2.934663E-01  3.004204E-01  2.872422E-01  7.850868E-01
    
```

Impedance matrix, in units of [ohms/kmeter] for the system of equivalent phase conductors.
 Rows and columns proceed in the same order as the sorted input.

```

1  8.437393E-02
   4.821768E-01

2  5.863546E-02  8.633031E-02
   1.580488E-01  4.720861E-01

3  5.663409E-02  5.863546E-02  8.437393E-02
   1.208911E-01  1.580488E-01  4.821768E-01
    
```

Impedance matrix, in units of [ohms/kmeter] for symmetrical components of the equivalent phase conductor
 Rows proceed in the sequence (0, 1, 2), (0, 1, 2), etc.; columns proceed in the sequence (0, 2, 1), (0, 2, 1), etc.

```

0  2.009627E-01
   7.701390E-01

1  -8.473189E-03  -2.402486E-02
   -3.368656E-03  1.465841E-02

2  7.153936E-03  2.705772E-02  2.470698E-02
   -5.653669E-03  3.331504E-01  1.347694E-02
    
```

Sequence	Surge impedance		Attenuation	velocity	Wavelength	Resistance	Reactance	Susceptance
	magnitude(ohm)	angle(degr.)	db/km	km/sec	km	ohm/km	ohm/km	mho/km
Zero :	5.56866E+02	-7.31242E+00	1.58014E-03	2.21602E+05	4.43204E+03	2.00963E-01	7.70139E-01	2.56669E-06
Positive:	3.10816E+02	-2.32162E+00	3.78381E-04	2.92376E+05	5.84751E+03	2.70577E-02	3.33150E-01	3.45989E-06

Blank card terminating frequency cards. | BLANK CARD ENDING FREQUENCY CARDS
 Blank card ending "LINE CONSTANTS" cases. | BLANK CARD ENDING LINE CONSTANTS CASES

Total case timing (CP, I/O, tot), sec: 9.777 0.000 9.777

Capítulo IV

Manobra de Banco de Capacitores

1. Introdução

O impacto da instalação de bancos de capacitores sobre os demais equipamentos de uma subestação é traduzido pelas correntes e tensões provocadas pelas manobras de energização desses bancos e também pelas correntes advindas da ocorrência de curto-circuito nas proximidades dos bancos (1).

A determinação das tensões provocadas pelas manobras de energização, visando a coordenação de isolamento da subestação, tem as seguintes finalidades:

⇒ o dimensionamento do resistor de fechamento do disjuntor de manobra do banco

⇒ a verificação da necessidade de instalação de pára-raios junto aos bancos.

Os estudos quanto à corrente têm a finalidade de determinar as correntes de valor elevado e a frequência correspondentes às manobras de energização do banco. No que se refere a curto-circuito, é feita uma pesquisa do ponto mais desfavorável da subestação que acarreta a maior solicitação ao equipamento que se deseja estudar.

2. Energização de Bancos de Capacitores

Existem duas situações distintas correspondentes à manobra de energização de bancos de capacitores, a saber:

⇒ Energização de um banco isolado

⇒ Energização de um banco com um outro já em operação na mesma subestação ("back-to-back")

2.1 Energização de um banco isolado

O circuito **R L C** série, da Figura 1, ilustra esta manobra, onde **V(t)**, **R** e **L** representam o equivalente de curto-circuito do sistema e **C**, o banco a ser energizado

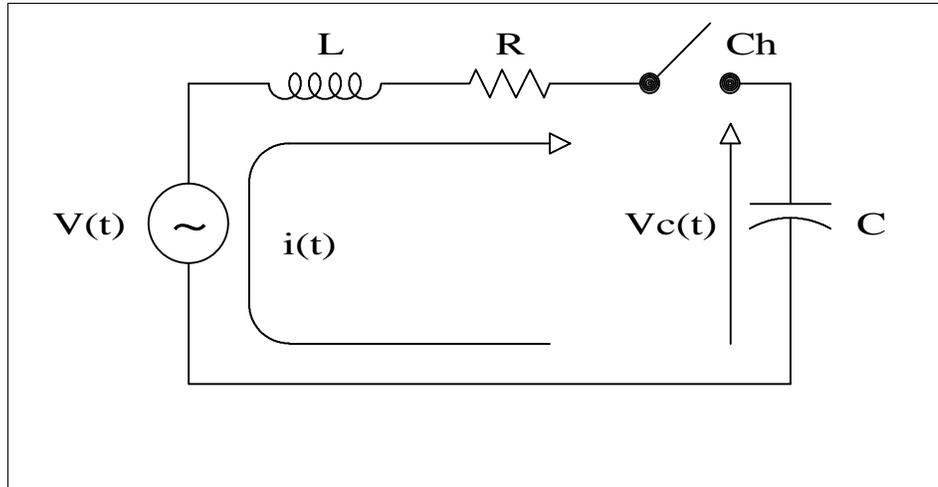


Figura 1 - Energização de Banco Isolado

Admitindo-se que a chave **Ch** feche no instante em que a tensão da fonte for máxima e que **R** << **L**, o valor máximo da corrente de energização do capacitor **C** é :

$$I_{C\text{máx}} = \frac{V_{\text{máx}}}{\sqrt{\frac{L}{C}}}$$

sendo:

$$V = V_{\text{máx}} \cos(\omega t)$$

a frequência da corrente é dada pela expressão:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

e o valor máximo da tensão no capacitor é:

$$V_c = 2V_{\text{máx}}$$

A forma de onda da corrente de energização de capacitor **C** está mostrada na Figura 2.

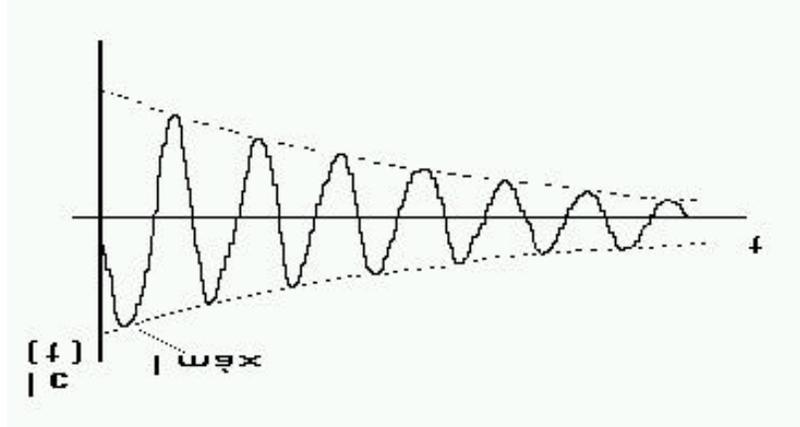


Figura 2 - Corrente de Energização do Capacitor **C**

2.2 Energização de um Banco com Outros em Operação ("Back-to-Back")

O circuito da Figura 3 ilustra esta manobra, onde **L₁** representa o equivalente de curto-circuito do sistema, **C₁** a capacitância do banco em operação, **L₂** a indutância equivalente (barramentos, intrínseca dos bancos, etc) entre os bancos e **C₂** o banco a ser energizado.

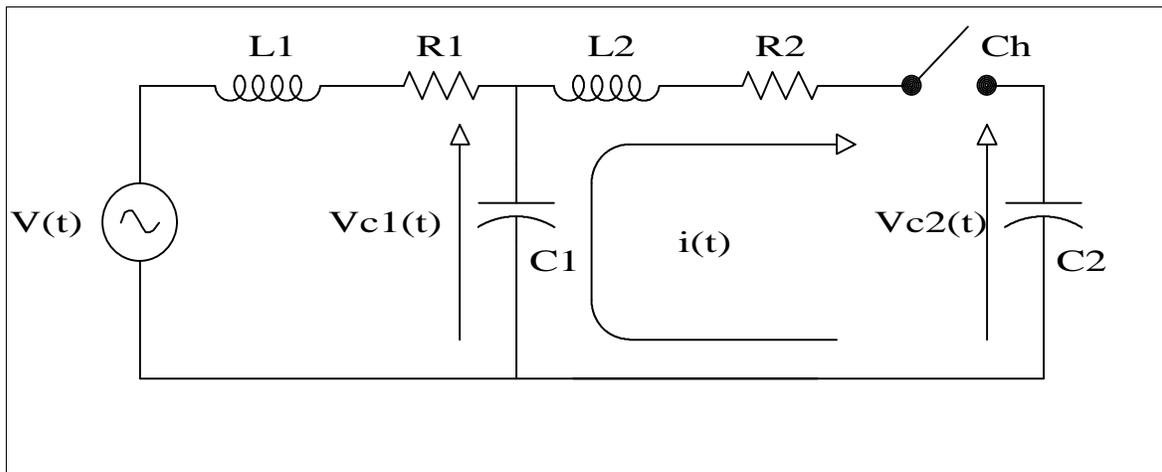


Figura 3 - Energização "Back-to-Back"

Neste caso, o banco em operação irá se descarregar durante a energização do outro banco.

Admitindo-se que a chave **Ch** feche no instante em que a tensão da fonte for máxima (igual a **V_{máx}**), que **L₁ >> L₂** e que **C_{eq}** é a capacitância resultante do paralelo entre **C₁** e **C₂**, o valor máximo da corrente de energização do capacitor **C₂** é:

$$I_{c_2 máx} = \frac{V_{máx}}{\sqrt{\frac{L_2}{C_{eq}}}}$$

a frequência da corrente é dada pela expressão:

$$F = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C e q}}$$

e o valor máximo da tensão no capacitor é:

$$V_{C2} = 2V_{m\acute{a}x}$$

A forma de onda da corrente de energização do capacitor C_2 é a mesma mostrada na Figura 2.

3. Curto-Circuito Próximo ao Banco de Capacitores

O circuito da Figura 4 ilustra a situação em que ocorre um curto-circuito próximo ao banco de capacitores C .

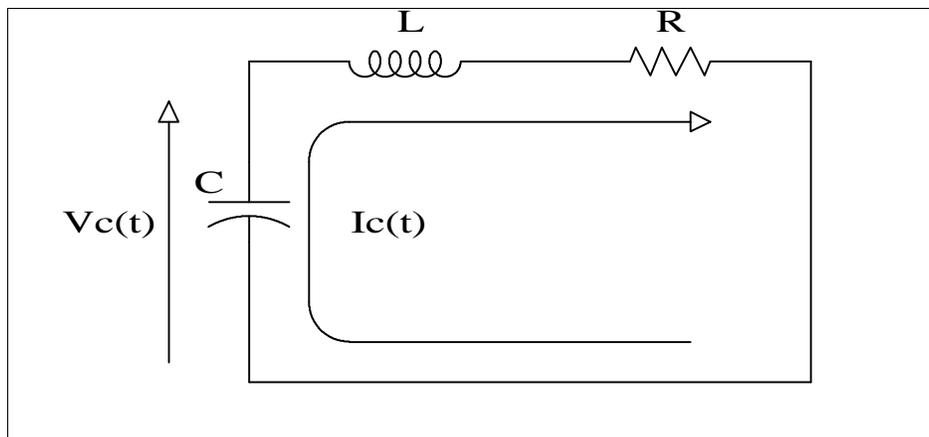


Figura 4 - Curto-Circuito Próximo ao Banco de Capacitores

Este circuito é idêntico ao da Figura 1, porém suas condições iniciais é que são diferentes, uma vez que o capacitor C já se encontra carregado em $t = 0$ e a tensão de excitação do circuito é nula. Neste circuito R e L representam a impedância equivalente do barramento (barramento, intrínseca do banco, etc) e $V_c(t) = V_{m\acute{a}x} \cos \omega t$.

A partir do instante de fechamento da chave Ch o capacitor C começa a se descarregar. Considerando que $R \ll L$, o valor máximo da corrente de descarga do capacitor C é:

$$I_{em\acute{a}x} = \frac{V_{m\acute{a}x}}{\sqrt{\frac{L}{C}}}$$

e a frequência da corrente é dada pela expressão:

$$F = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

4. Conclusões

Os resultados obtidos da análise desenvolvida nos itens 2 e 3 podem ser agrupados conforme segue:

Corrente:

$$I_{cmáx} = \frac{V_{máx}}{\sqrt{\frac{L}{C}}}$$

Frequência:

$$F = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

A Tabela 1 estabelece valores para **L** e **C** para o cálculo da corrente e da frequência, conforme o tipo de manobra.

Tabela 1- Valores de Indutância e de Capacitância Conforme o Tipo de Manobra

Manobra	Indutância	Capacitância
Energização de banco isolado	Indutância equivalente de curto-circuito	Capacitância do banco a ser energizado
Energização "back-to-back"	Indutância equivalente entre bancos	Capacitância do banco a ser energizado em paralelo com a dos bancos existentes
Curto-circuito próximo ao banco	Indutância equivalente do barramento entre o banco e o curto-circuito	Capacitância do banco em curto-circuito

5. Modelagem no ATP

5.1 Representação da Rede

O estudo deve ser realizado com a representação trifásica da rede para que possa ser computado o efeito do acoplamento entre fases, muito embora a experiência tem demonstrado que a representação monofásica é satisfatória em casos em que a subestação possui níveis de curto-circuito monofásicos e trifásicos praticamente iguais ($X_0 = X_1$) e os bancos de capacitores são ligados em estrela aterrada.

5.2 Equivalentes

Toda a rede elétrica vista dos terminais do disjuntor deve ser substituída pelo equivalente de curto-circuito. Devem, também, ser representadas as impedâncias dos trechos de barramento entre os terminais do disjuntor e os do banco de capacitores (1 microhenry/metro, aproximadamente).

No caso de representação trifásica, o modelo do ATP indicado para os equivalentes e para as impedâncias dos barramentos é o de elementos R-L acoplados (51, 52 e 53) e no caso de representação monofásica, pelo modelo de elementos concentrados. As fontes devem ser representadas pelo modelo de fonte senoidal do ATP (tipo 14).

5.3 Disjuntor

Os disjuntores devem ser representados pelo modelo de chave simples tempo-controlada do ATP. No caso de representação trifásica, deve ser observada a abertura dos três polos do disjuntor.

5.4 Tempo Total do Estudo e Passo de Integração

O tempo total de estudo deve ser suficiente para registrar o amortecimento dos transitórios. O valor de 100 milissegundos atende a este requisito. Para passo de integração, deve-se usar um valor de 50 microssegundos.

6. Aplicação Numérica com o ATP

6.1 Circuito a ser simulado e dados

Para o sistema da Figura 5, energizar o banco de capacitores trifásico de 200 MVar, adotando a modelagem trifásica, verificando as tensões e correntes no banco, considerando os seguintes dados:

⇒ Equivalente de Curto-Circuito

$$Z_0 = (1,1025 + j 55,125) \text{ ohms}$$

$$Z_1 = (1,3965 + j 69,825) \text{ ohms}$$

$$V(t) = 857321,4 \cos(2\pi wt) \text{ volts}$$

⇒ Banco de Capacitores

banco trifásico de 200 MVar, tensão nominal 1050 kV, ligado em estrela aterrada

$$Y_C = 181,41 \text{ micromhos por fase}$$

⇒ Chave Ch

fecha em $t = 0$

⇒ Intervalo de Integração e Tempo Máximo de Estudo no ATP

$$\text{DELTAT} = 50.E-6 \text{ seg}$$

$$\text{TMAX} = 100.E-3 \text{ seg}$$

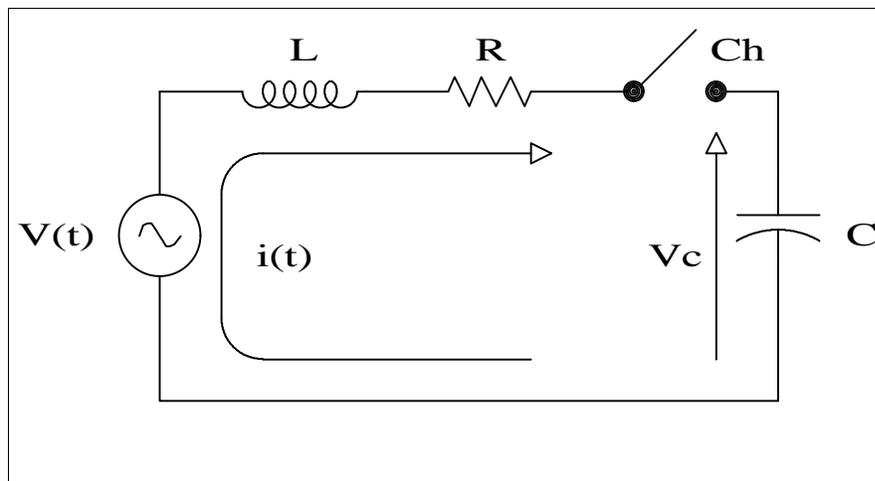


Figura 5 - Energização de Banco de 200 MVar

6.2 Montagem do arquivo e simulação no ATP

A Figura 6 mostra o arquivo de entrada de dados do ATP correspondente ao exemplo em questão.

```
BEGIN NEW DATA CASE
C MANOBRA DE BANCO DE CAPACITORES - CAPITULO 2   FILE =ATP\SCRATCH\EXE1.DAT
C DADOS MISCELANEOS
-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----+
10.E-5  10.E-2    60.0   60.0
      100      1      1      1      1      1
C ELEMENTOS R L ACOPLADOS
51FONT-AEQUI-A          1.1025    55.125
52FONT-BEQUI-B          1.3965    69.825
53FONT-CEQUI-C
-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----+
C ELEMENTOS R L C
      CAPA-A          181.41
      CAPA-B          181.41
      CAPA-C          181.41
BLANK CARD ENDING BRANCH CARDS
C INTERRUPTORES
-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----+
      EQUI-ACAPA-A      0.0    1.0
      EQUI-BCAPA-B      0.0    1.0
      EQUI-CCAPA-C      0.0    1.0
BLANK CARD ENDING SWITCH CARDS
C FONTES
14FONT-A  857231.40    60.    0.    -1.0
14FONT-B  857231.40    60.  -120.  -1.0
14FONT-C  857231.40    60.   120.  -1.0
BLANK CARD ENDING SOURCE CARDS
-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----+
      CAPA-ACAPA-BCAPA-C
BLANK CARD ENDING OUTPUT CARDS
BLANK CARD ENDING PLOT CARDS
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
```

Figura 6 - Arquivo de Entrada de Dados para o ATP

As seguintes informações estão contidas no arquivo mostrado na Figura 6:

6.2.1 Primeira Instrução

```
-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----+
BEGIN NEW DATA CASE
C MANOBRA DE BANCO DE CAPACITORES - CAPITULO 2   FILE =ATP\SCRATCH\EXE1.DAT
```

Instrução opcional utilizada em todo início de arquivo para sinalizar o início de um novo caso (pode ser utilizada também como separação de casos em arquivos contendo vários casos). Para maiores detalhes ver item II-A do ATP Rule Book, Optional Case-Separation Card.

A segunda linha é um comentário (C na coluna 1 seguido de branco na coluna 2), utilizado para identificação do arquivo. Todas as colunas a partir da coluna 3 podem ser utilizadas para o texto referente ao comentário.

6.2.2 Primeiro Grupo de Informações - Miscellaneous Data Cards

```
C DADOS MISCELANEOS
-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----+
10.E-5  10.E-2    60.0    60.0
      100        1        1        1        1                1
```

São as primeiras instruções obrigatórias e contém dados miscelâneos de ponto flutuante para o processamento do caso e dados inteiros para a especificação básica de saída de resultados.

Na primeira linha de informações se encontram o intervalo de integração (DELTAT), tempo total de simulação (TMAX), frequência para definição dos parâmetros referentes às indutâncias (XOPT) e às capacitâncias (COPT), tolerâncias (EPSILN e TOLMAT) e tempo para reiniciar um caso (TSTART).

Neste caso foi especificado um DELTAT de 100 microssegundos e um TMAX de 100 milissegundos pelas razões já expostas anteriormente no item 5.4.

O valor especificado para XOPT e COPT foi 60, o que significa que os valores especificados para as indutâncias e para as capacitâncias serão interpretados pelo ATP como sendo em ohms e micromhos, respectivamente.

Os demais parâmetros EPSLIN e TSTART não foram especificados e, portanto, o ATP assume valores "default" para os mesmos, o que ocorre na maioria dos casos com relação a estes parâmetros (item II-B do ATP Rule Book, Floating-point Miscellaneous Data Card).

A segunda instrução obrigatória contém a quantidade de pontos para impressão (IOUT), a quantidade de pontos para gráficos (IPLOT) e os "flags" para impressão da tabela de conexões (IDOUBL), dos fluxos nos ramos da rede (KSSOUT), dos valores máximos das variáveis (MAXOUT), das mudanças da frequência de impressão (IPUN), do controle de gravação da memória do ATP em disco para uso subsequente com "START AGAIN" (MENSAV), da gravação permanente de pontos para posterior plotagem (ICAT), do número de energização em casos de chaves estatísticas ou sistemáticas (NENERG) e do controle de impressão de diagnóstico (IPRSUP).

Neste caso foi especificado que a frequência de saída é de 100 em 100 (IOUT = 100), que todos os pontos são disponíveis para a saída gráfica (IPLOT = 1), que serão impressos a tabela de conexões (IDOUBL = 1), os fluxos nos ramos da rede (KSSOUT = 1) e os valores máximos das variáveis (MAXOUT = 1) e que serão gravados pontos para plotagem (ICAT = 1).

Os demais parâmetros IPUN, MENSAV, NENERG e IPRSUP não foram especificados, pois não se aplicam ao presente caso (item II-B do ATP Rule Book, Integer Miscellaneous Data Card).

6.2.3 Ramos Lineares e Não Lineares

C ELEMENTOS R L ACOPLADOS			
51FONT-AEQUI-A	1.1025	55.125	
52FONT-BEQUI-B	1.3965	69.825	
3FONT-CEQUI-C			
-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----			
C ELEMENTOS R L C			
CAPA-A		181.41	
CAPA-B		181.41	
CAPA-C		181.41	
BLANK CARD ENDING BRANCH CARDS			

Os elementos que compõem a rede elétrica no presente caso são o banco de capacitores, representado pelo modelo de elementos concentrados (itens IV-A do ATP Rule Book, Branch Card for Uncoupled, Lumped, Séries R-L-C Branch) e o equivalente de curto-circuito, representado pelo modelo de elementos R-L mutuamente acoplados do tipo 51, 52 e 53 (item IV-C do ATP Rule Book, Branch Cards for Mutually-compled R-L Elements).

6.2.4 Interruptores

C INTERRUPTORES			
-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----			
EQUI-ACAPA-A	0.0	1.0	
EQUI-BCAPA-B	0.0	1.0	
EQUI-CCAPA-C	0.0	1.0	
BLANK CARD ENDING SWITCH CARDS			

O disjuntor do presente estudo corresponde ao modelo de chaves simples tempo controlado do ATP.

Foi especificada uma chave simples (ITYPE = 0), entre os nós EQUI e CAPA, que se encontrava aberta em regime permanente, fechando no início da simulação (TCLOSE = 0), assim permanecendo até o final do processamento (TOPEN = 1). Na coluna 80 é especificado o valor 1 correspondente a solicitação de saída de corrente através das chaves (item VI do ATP Rule Book, Switch Cards).

6.2.5 Fontes

C FONTES			
-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----			
14FONT-A	857231.40	60.	0.
14FONT-B	857231.40	60.	-120.
14FONT-C	857231.40	60.	120.
BLANK CARD ENDING SOURCE CARDS			

A fonte de alimentação do circuito foi representada pelo modelo de fonte de tensão senoidal, tipo 14 do ATP, conectada ao nó FONT de amplitude igual a 857321,4 volts, frequência de 60 Hz e ângulo de fase igual a 0 graus. O valor do parâmetro TSTART igual a - 1 significa que as fontes já se encontravam ligadas no regime permanente e o parâmetro TSTOP igual a 1, que as fontes permanecem ligadas até o fim da simulação (item VII-A do ATP Rule Book, Static Electric Network Source Functions).

6.2.6 Especificação para Saída

```
-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----  
CAPA-ACAPA-BCAPA-C  
BLANK CARD ENDING OUTPUT CARDS
```

Em complemento às opções existentes na maioria dos componentes da rede elétrica para as variáveis dos ramos (coluna 80 em cada componente), há a possibilidade de se especificar todos os tipos de variáveis nesta parte do arquivo. Geralmente estas informações são utilizadas somente para as tensões dos nós. No presente caso, foram especificadas as tensões dos nós CAPA-A, CAPA-B, CAPA-C (item XII do ATP - Rule Book, Output - Variable Specification Cards)

6.2.7 Informações Complementares

Os grupos de dados descritos acima devem ser sempre terminados por uma linha em branco.

Também é necessária mais uma linha em branco para terminar o caso, seguida de outra linha, com a declaração BEGIN NEW DATE CASE e de mais outra linha em branco.

```
-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----  
BLANK CARD ENDING PLOT CARDS  
BEGIN NEW DATA CASE  
BLANK
```

Bibliografia

(1) - "Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento - Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão" - livro técnico publicado por FURNAS/UFF, 1987 - D'AJUZ, A. e outros - CAP. 18.

Alternative Transients Program (ATP), Salford 386 translation. Copyright 1987. Use licensed only by LEC (K.U. Leuven, Belgium).
 Date (dd-mth-yy) and time of day (hh.mm.ss) = 14-Sep-94 10.53.47 Name of disk plot file, if any, is C:\EXEL.pl4
 For information, consult the copyrighted ATP EMTF Rule Book published by LEC in July, 1987. Last major program update: Oct, 1990
 Total length of "LABCOM" tables = 2251555 INTEGER words. "VARDIM" List Sizes follow : 5002 6000 10000 1000 50000
 800 14000 35000 1500 3200 1000 1000100000 400 64800 800 80 100 32000 13200 2000 3000 80000 60 8000 1680 20

Descriptive interpretation of input data cards. | Input data card images are shown below, all 80 columns, character by character
 0 1 2 3 4 5 6 7 8
 0123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

```

Comment card. KOMPAN = 1. | C data:EXEL.DAT
Marker card preceding new EMTF data case. | BEGIN NEW DATA CASE
Comment card. KOMPAN = 1. | C MANOBRA DE BANCO DE CAPACITORES - CAPITULO 2 FILE = ATP\SCRATCH\EXEL.DAT
Comment card. KOMPAN = 1. | C DADOS MISCELANEOS
Comment card. KOMPAN = 1. | C ----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
Misc. data. 1.000E-04 1.000E-01 6.000E+01 | 10.E-5 10.E-2 60.0 60.0
Misc. data. 100 1 1 1 0 0 1 0 0 | 100 1 1 1 1 1
Comment card. KOMPAN = 1. | C ELEMENTOS R L ACOPLADOS
1st of coupled R-L. 1.10250E+00 1.46224E-01 | 51FONT-AEQUI-A 1.1025 55.125
1.397E+00 1.852E-01 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 | 52FONT-BEQUI-B 1.3965 69.825
-9.800E-02-1.300E-02-9.800E-02-1.300E-02 1.298E+00 | 53FONT-CEQUI-C
Comment card. KOMPAN = 1. | C ----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
Comment card. KOMPAN = 1. | C ELEMENTOS R L C
Series R-L-C. 0.000E+00 0.000E+00 4.812E-07 | CAPA-A 181.41
Series R-L-C. 0.000E+00 0.000E+00 4.812E-07 | CAPA-B 181.41
Series R-L-C. 0.000E+00 0.000E+00 4.812E-07 | CAPA-C 181.41
Blank card ending branches. IBR, NTOT = 6 10 | BLANK CARD ENDING BRANCH CARDS
Comment card. KOMPAN = 1. | C INTERRUPTORES
Comment card. KOMPAN = 1. | C ----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
Switch. 0.00E+00 1.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 | EQUI-ACAPA-A 0.0 1.0
Switch. 0.00E+00 1.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 | EQUI-BCAPA-B 0.0 1.0
Switch. 0.00E+00 1.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 | EQUI-CCAPA-C 0.0 1.0
Blank card ending switches. KSWTCH = 3. | BLANK CARD ENDING SWITCH CARDS
Comment card. KOMPAN = 1. | C FONTES
Source. 8.57E+05 6.00E+01 0.00E+00 -1.00E+00 | 14FONT-A 857231.40 60. 0. -1.0
Source. 8.57E+05 6.00E+01 -1.20E+02 -1.00E+00 | 14FONT-B 857231.40 60. -120. -1.0
Source. 8.57E+05 6.00E+01 1.20E+02 -1.00E+00 | 14FONT-C 857231.40 60. 120. -1.0
Blank card ends electric network sources. | BLANK CARD ENDING SOURCE CARDS
  
```

List of input elements that are connected to each node. Only the physical connections of multi-phase lines are shown (capacitive and inductive coupling are ignored). Repeated entries indicate parallel connections. Switches are included, although sources (including rotating machinery) are omitted -- except that U.M. usage produces extra, internally-defined nodes "UMXXXX".

From bus name	Names of all adjacent busses.
FONT-A	EQUI-A*
EQUI-A	FONT-A*CAPA-A*
FONT-B	EQUI-B*
EQUI-B	FONT-B*CAPA-B*
FONT-C	EQUI-C*
EQUI-C	FONT-C*CAPA-C*
CAPA-A	TERRA *EQUI-A*
CAPA-B	TERRA *EQUI-B*
CAPA-C	TERRA *EQUI-C*
TERRA	CAPA-A*CAPA-B*CAPA-C*

Sinusoidal steady-state phasor solution, branch by branch. All flows are away from a bus, and the real part, magnitude, or "P" is printed above the imaginary part, the angle, or "Q". The first solution frequency = 6.0000000E+01 Hertz.

Bus K	Bus M	Phasor node voltage		Phasor branch current		Power flow		Power loss	
		Rectangular	Polar	Rectangular	Polar	P and Q	P and Q	P and Q	
FONT-A		857231.4	857231.4	-.427930421E-13	.4280159982E-13	-.1834176968E-7	.7754818243E-24		
		0.0	0.0	-.855860841E-15	-178.8542372	.36683539364E-9	0.0000000		
EQUI-A		857231.4	857231.4	.4279304207E-13	.4280159982E-13	.18341769682E-7			
		.2745201464E-11	0.0000000	.8558608414E-15	1.1457628	-.3668353936E-9			
FONT-B		-428615.7	857231.4	-.349330956E-14	.3494008149E-14	.77457743762E-9	-.372594783E-25		
		-742384.1693217	-120.0000000	-.698661911E-16	-178.8542372	.12817159835E-8	0.0		
EQUI-B		-428615.7	857231.4	.3493309557E-14	.3494008149E-14	-.7745774376E-9			
		-742384.1693217	-120.0000000	.6986619113E-16	1.1457628	-.1281715984E-8			
FONT-C		-428615.7	857231.4	-.349330956E-14	.3494008149E-14	.72270988335E-9	-.269601103E-25		
		742384.1693217	120.0000000	-.698661911E-16	-178.8542372	-.131166173E-8	0.0		
EQUI-C		-428615.7	857231.4	.3493309557E-14	.3494008149E-14	-.7227098833E-9			
		742384.1693217	120.0000000	.6986619113E-16	1.1457628	.13116617299E-8			
Total network loss P-loss by summing injections =				1.550963648537E-25					

Output for steady-state phasor switch currents.

Node-K	Node-M	I-real	I-imag	I-magn	Degrees	Power	Reactive
EQUI-A	CAPA-A	T-close at t=0+					
EQUI-B	CAPA-B	T-close at t=0+					
EQUI-C	CAPA-C	T-close at t=0+					

Solution at nodes with known voltage. Nodes that are shorted together by switches are shown as a group of names, with the printed result applying to the composite group. The entry "MVA" is SQRT(P**2 + Q**2) in units of power, while "P.F." is the associated power factor.

Node name	Source node voltage		Injected source current		Injected source power	
	Rectangular	Polar	Rectangular	Polar	P and Q	MVA and P.F.
FONT-A	857231.4	857231.4	-.597299987E-13	.4858002858E-12	-.2560121521E-7	.20822162958E-6
	0.0	0.0	-.482114348E-12	-97.0624877	.20664177894E-6	-0.1229518

```

FONT-B      -428615.7      857231.4      -.855537863E-12  .8786055462E-12  .10910758425E-6  .37658413122E-6
          -742384.1693217      -120.0000000      .2000066779E-12      166.8417706      .36043188391E-6      0.2897296

FONT-C      -428615.7      857231.4      .3552713679E-14  .4765017209E-13  -.1839951119E-7  .20423611867E-7
          742384.1693217      120.0000000      -.475175455E-13      -85.7241589      -.8864643807E-8      -0.9008941

Comment card.  KOMPAN = 1.          |C -----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
Card of names for time-step loop output.  | CAPA-ACAPA-BCAPA-C
Blank card ending requests for output variables. | BLANK CARD ENDING OUTPUT CARDS

Column headings for the 3 EMT output variables follow. These are divided among the 5 possible classes as follows ...
First 3 output variables are electric-network voltage differences (upper voltage minus lower voltage);
Step      Time      CAPA-A      CAPA-B      CAPA-C

***          Switch "EQUI-A" to "CAPA-A" closed after 0.00000000E+00 sec.
***          Switch "EQUI-B" to "CAPA-B" closed after 0.00000000E+00 sec.
***          Switch "EQUI-C" to "CAPA-C" closed after 0.00000000E+00 sec.
0          0.0          0.0          0.0          0.0
100         .01      -672502.85  -185530.84  858033.69
200         .02      .1042014E7  224708.411  -.126672E7
300         .03      -58152.762  -623599.17  681751.935
400         .04      -.129527E7  .1037152E7  258114.018
500         .05      .1400099E7  -738030.78  -662068.51
600         .06      -356624.27  -200040.2   556664.47
700         .07      -359158.73  905272.852  -546114.12
800         .08      188704.057  -872592.67  683888.616
900         .09      -88384.801  500744.851  -412360.05
% % % % % Final time step, PLTFIL dumps plot data to ".PL4" disk file.
Done dumping plot points to C-like disk file.
1000        0.1      705235.187  -299766.29  -405468.89

Extrema of output variables follow. Order and column positioning are the same as for the preceding time-step loop output.
Variable maxima : .1660612E7 .1278931E7 .1287274E7
Times of maxima : .1E-2 .0057 .0115
Variable minima : -.16658E7 -.126341E7 -.13072E7
Times of minima : .0076 .0142 .0029

Blank card terminating all plot cards.          |BLANK CARD ENDING PLOT CARDS
Actual List Sizes for the preceding solution follow.          14-Sep-94 10.54.02
Size 1-10:      10      6      9      3      36      3      11      0      0      0
Size 11-20:     0      3 -9999 -9999 -9999      0      0      0      23      0
Size 21-29:     0      0      18      0 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999
Seconds for overlays 1-5 :      12.418      0.000      12.418 --- (CP: I/O; tot)
Seconds for overlays 6-11 :      1.156      0.000      1.156
Seconds for overlays 12-15 :      0.438      0.000      0.438
Seconds for time-step loop :      0.988      0.000      0.988
Seconds after DELTAT-loop :      0.223      0.000      0.223
-----
Totals :      15.223      0.000      15.223

```

Sugestões para outras Simulações :

1. Alterar o intervalo de integração para 200 microssegundos
2. Alterar a resistência para $R_o = 5.0$ e $R_1 = 6.0$
3. Alterar a frequência da fonte para 0.001 Hz

Capítulo V

Tensões e Correntes Induzidas em Circuitos Paralelos

1. Introdução

Em circuitos paralelos de linhas de transmissão que compartilham a mesma faixa de servidão, estando um deles sob carga e o outro desenergizado, aterrado ou não, devido aos acoplamentos indutivos e capacitivos entre os mesmos, as tensões e correntes induzidas no circuito desenergizado podem atingir valores relevantes de tal forma que as chaves de terra deste circuito, quando em manobra de abertura, fiquem submetidas a severas solicitações, tanto de corrente a ser interrompida como de tensão de restabelecimento transitória (1, 2, 3). O fenômeno ainda se agrava caso os circuitos sejam suportados por torres de circuito duplo (4, 5).

2. Generalidades

Na manobra de abertura da chave de terra, a corrente interrompida é a corrente induzida no circuito correspondente. Após o amortecimento dos transitórios (que surgem antes e depois da extinção do arco que se forma), a tensão que se estabelece através dos contatos dessa lâmina é a tensão induzida.

Partindo da situação em que as chaves de terra se encontram fechadas em ambos os terminais do circuito, a primeira chave a abrir interromperá um valor elevado de corrente, ao passo que a tensão que se estabelecerá através de seus contatos será pequena, pois o outro terminal do circuito ainda estará aterrado e, portanto, com tensão nula.

Em seguida, quando a chave do outro terminal abrir, a corrente a ser interrompida será pequena, pelo fato de um terminal já estar aberto, mas ainda existir caminho para a corrente devido às capacitâncias do circuito para terra. Entretanto, a tensão a se estabelecer através dos contatos da chave será elevada, pois o circuito já não estará mais aterrado em nenhum ponto.

A chave de terra, portanto, deve suportar as solicitações de tensão e corrente para as duas condições acima descritas, isto é, abertura indutiva, para a primeira chave a abrir e abertura, para a segunda chave a abrir. Dependendo da severidade dos requisitos de manobra de abertura, duas classes de chaves de terra devem ser consideradas: Classe A e Classe B (6, 7).

As chaves de terra classe A correspondem à grande maioria das situações onde o acoplamento entre circuitos é fraco e os segmentos paralelos de linha de transmissão são relativamente curtos. Os requisitos de tensões e correntes induzidas são tais que as chaves de terra convencionais são adequadas a esta aplicação.

As chaves de terra classe B correspondem a todas as demais aplicações onde o acoplamento entre circuitos é de forte e os segmentos paralelos de linha de transmissão são relativamente longos. Os requisitos de tensões e correntes induzidas são tais que as chaves de terra convencionais devem ser dotadas de algum dispositivo auxiliar para interrupção ou devem ser utilizadas chaves de terra contendo requisitos especiais de projeto.

Durante a fase de planejamento devem ser analisadas soluções que visem minorar os efeitos das tensões e correntes induzidas nas chaves de terra. A seguir são sugeridos dois tipos de solução

2.1 Redução dos Níveis das Tensões e Correntes Induzidas

A redução dos níveis das tensões e correntes induzidas pode ser conseguida através da transposição dos circuitos da linha de transmissão e da disposição adequada das fases dos circuitos.

2.2 Utilização de Dispositivos para Extinção do Arco

A instalação de acessórios nas chaves de terra, tais como hastes com molas e dispositivos que proporcionem jatos de ar comprimido, é uma solução conhecida para facilitar a extinção do arco que se origina devido à interrupção da corrente, reduzindo, com isso, os efeitos danosos desse arco nos contatos da chave de terra.

3. Análise Matemática

A análise a seguir, realizada para um circuito monofásico, apesar de ser simplificada, dá uma idéia de como o fenômeno se processa. Na Figura 1 está esquematizada uma linha de transmissão de circuito duplo, onde o circuito está sob carga e o circuito II, desenergizado e aterrado em ambos os terminais.

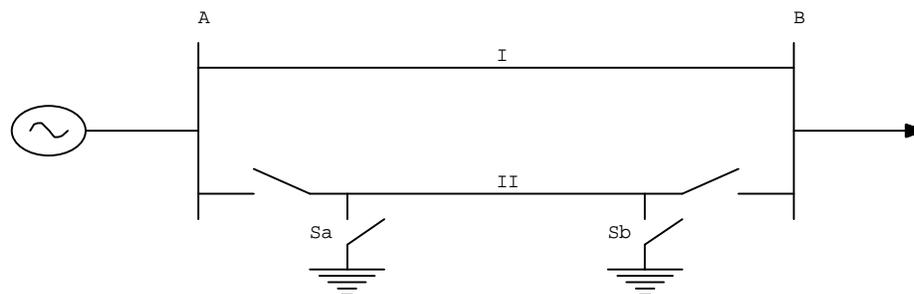


Figura 1- Circuitos Paralelos de Linhas de Transmissão na Mesma Faixa de Passagem

3.1 Abertura do Primeiro Terminal (Ponto A)

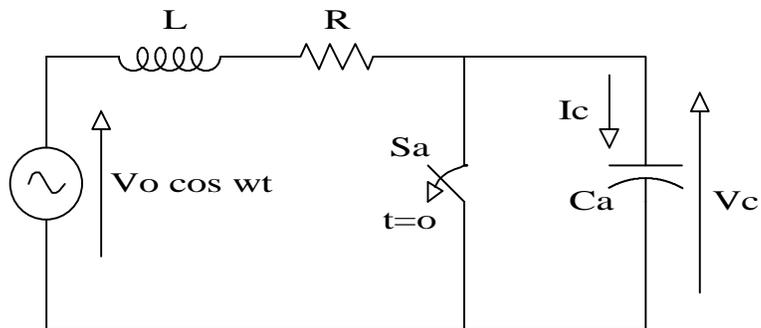


Figura 2 - Circuito Equivalente para Abertura do 1º Terminal

O circuito II, aterrado em ambos os terminais, pode ser representado pelo circuito equivalente da Figura 2 onde:

- ⇒ S_a = chave de terra do terminal A
- ⇒ R = resistência total do circuito
- ⇒ L = indutância total do circuito
- ⇒ C_a = metade da capacitância do circuito concentrada no ponto A
- ⇒ $V_o \cos \omega t$ é a fonte de tensão equivalente que produzirá uma corrente igual à corrente induzida no circuito desenergizado

A corrente a ser interrompida é a que se estabelece no circuito antes da abertura de **S_a**. Esta corrente é predominantemente de natureza indutiva.

Após a abertura da chave de terra **S_a**, a tensão que aparecerá entre seus contatos será igual à tensão desenvolvida no capacitor **C_a**.

A equação para a determinação dessa tensão é a seguinte:

$$\frac{d^2V_c}{dt^2} + \frac{RdV_c}{L dt} + \frac{1}{LC}V_c - \frac{1}{LC}V_0\text{COS } Wt$$

Admitindo-se que **Sa** abra em $t = 0$ e considerando-se desprezível a resistência **R** do circuito, lembrando ainda que antes da abertura de **Sa** a tensão no capacitor **Ca** é nula, a solução da equação é a seguinte:

$$V_c(t) = V_0 (\cos wt - \cos w_0t)$$

Onde $w_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ é a frequência natural de oscilação do circuito.

Na Figura 3 está mostrado o gráfico de $V_c(t)$.

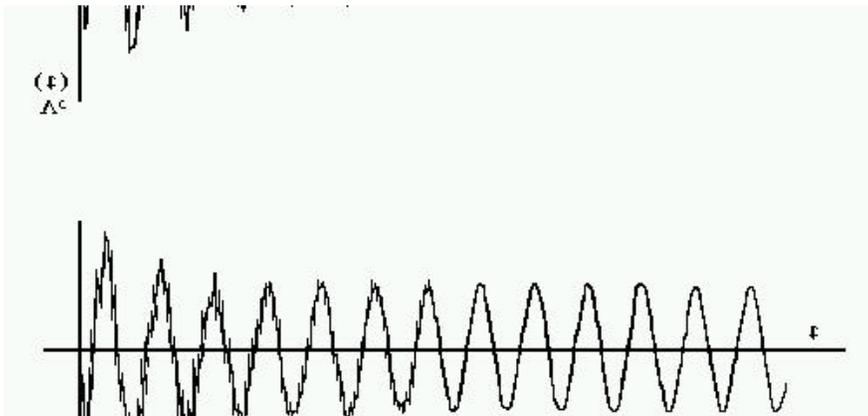


Figura 3 - Tensão Através do Capacitor após Abertura do Primeiro Terminal

3.2 Abertura do Segundo Terminal (Ponto B)

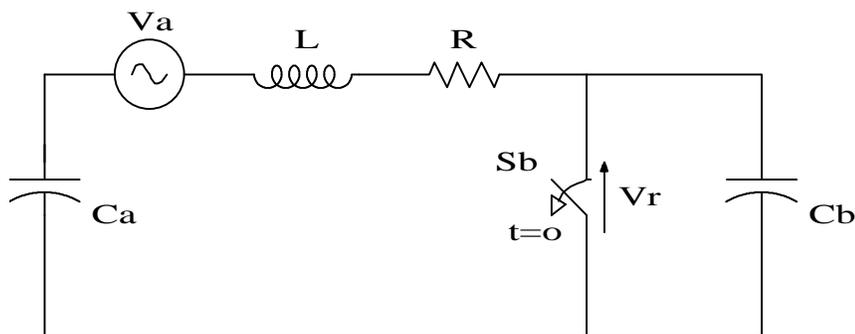


Figura 4 - Abertura do Segundo Terminal da Linha de Transmissão

O circuito II, agora desaterrado no terminal A, pode ser apresentado pelo circuito equivalente da Figura 4, onde

⇒ S_b = chave de terra

⇒ R = resistência total do circuito

⇒ L = indutância total do circuito

⇒ C_a = metade da capacitância do circuito, concentrada no ponto A

⇒ C_b = metade da capacitância do circuito, concentrada no ponto B

⇒ $V_a = V_a \cos \omega t$ = fonte de tensão equivalente representativa do acoplamento indutivo com o circuito I

A corrente a ser interrompida é a que se estabelece no circuito antes da abertura de **S_b** , ainda de natureza predominantemente indutiva.

Com a abertura da chave de terra **S_b** , o circuito II fica totalmente isolado da terra e seu acoplamento com o circuito I passa a ser predominantemente capacitivo.

A expressão da tensão **$V_r(t)$** através dos contatos de **S_b** , mostrada na Figura 5, será:

$$V_r(t) = V_a (1 - \cos \omega t)$$

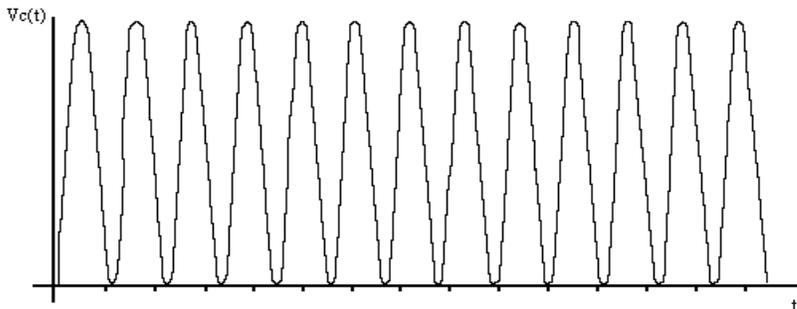


Figura 5 - Tensão Através dos Contatos da Segunda Chave a Abrir

4. Modelagem no ATP

4.1 Representação da Rede

O estudo deve ser realizado com a representação trifásica da rede, de modo a ser possível a observação da abertura dos três pólos da chave de terra. A representação monofásica se aplica apenas em análises simplificadas.

Como o tempo de abertura de uma chave é muito maior do que o de um disjuntor, o regime transitório só contribui com a informação do valor do pico máximo da tensão de restabelecimento através dos contatos de cada polo da chave de terra. Os valores de tensões e correntes induzidas a serem utilizadas para fins de especificação são os verificados após o amortecimento completo dos transitórios de manobra, ou seja, em regime permanente. Deve ser representado o trecho dos circuitos paralelos da linha de transmissão entre duas subestações adjacentes.

4.2 Linhas de Transmissão

As linhas de transmissão devem ser representadas por um modelo que permite a simulação dos acoplamentos eletromagnéticos e eletrostáticos entre fases e entre circuitos paralelos. Portanto, o modelo indicado é o modelo Pi do ATP.

4.3 Chaves de Terra

As chaves de terra devem ser representadas pelo modelo de chave simples tempo-controlada do ATP. Deve ser observada a abertura dos três pólos da chave de terra.

4.4 Fontes

A finalidade das fontes é garantir o fluxo de potência desejado através do circuito da linha de transmissão. Portanto, as mesmas devem ser representadas pelo modelo de fonte senoidal (tipo 14) do ATP, com seus ângulos de fase devidamente ajustados.

4.5 Tempo total do Estudo e Passo de Integração

O tempo total do estudo deve ser suficiente para registrar a transição entre os regimes transitório e permanente. O valor de 100 ms atende a este requisito. Para passo de integração, deve-se usar um valor de 100 microssegundos.

5. Aplicação Numérica com o ATP

Calcular o valor eficaz corrente induzida no circuito B da linha de transmissão da figura 6, desenergizado e aterrado em ambas subestações terminais através de suas chaves de terra, para o caso em que o circuito A se encontra energizado e conduzindo corrente.

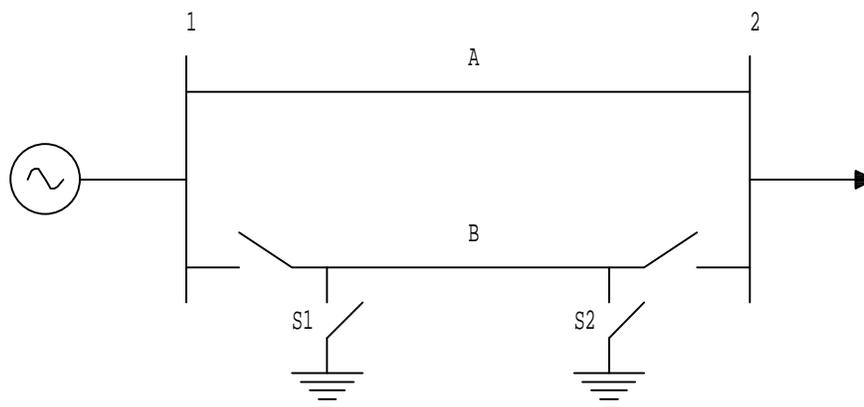


Figura 6 - Sistema Esquemático para o Cálculo das Tensões e Correntes Induzidas

As informações necessárias para a representação do sistema indicado na Figura 6 encontram-se a seguir:

⇒ Tensões de excitação

$$V_1(t) = 408248,29 \cos(2\pi 60 t) \text{ volts}$$

$$V_2(t) = 408248,29 \cos(2\pi 60 t - 7^\circ) \text{ volts}$$

⇒ Matriz de acoplamento entre circuitos (resistências em Ω , reatâncias em Ω e admitâncias em $\mu\Omega^{-1}$).

$$R_{11}=4.4875 \quad X_{11}=42.254 \quad Y_{11}=104.41$$

$$R_{21}=3.2998 \quad X_{21}=18.110 \quad Y_{21}=-7.665 \quad R_{22}=4.4875 \quad X_{22}=42.254 \quad Y_{22}=104.41$$

⇒ Intervalo de integração e tempo máximo de estudo

$$\text{DELTAT} = 100.E-6 \text{ seg}$$

$$\text{TMAX} = 100.E-3 \text{ seg}$$

```

-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----+
BEGIN NEW DATA CASE
C TENSOES E CORRENTES INDUZIDAS FILE = ATP\SCRATCH\EXE3.DAT
C DADOS MISCELANEOS
  10.E-5  10.E-2    60.    60.
    100    1      1      1      1      1
C ELEMENTOS R L C ACOPLADOS
  1   1A   2A           4.487542.254104.41
  2   1B   2B           3.299818.110-7.6654.487542.254104.41
BLANK CARD ENDING BRANCH CARDS
C INTERRUPTORES
-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----+
      1B      -1.0      1.
      2B      -1.0      1.
BLANK CARD ENDING SWITCH CARDS
C FONTES
14   1A   408248.29    60.    0.00      -1.0
14   2A   408248.29    60.   -7.00      -1.0
BLANK CARD ENDING SOURCE CARDS
      1A   2A   1B   2B
BLANK CARD ENDING OUTPUT CARDS
BLANK CARD ENDING PLOT CARDS
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK CARD ENDING ALL CASES
-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----+

```

Figura 7 - Arquivo de Entrada de Dados para o ATP

A figura 7 mostra o arquivo de entrada de dados para o ATP correspondente ao exemplo em questão, constituído das seguintes instruções:

```

-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----+
BEGIN NEW DATA CASE
C TENSOES E CORRENTES INDUZIDAS FILE = ATP\SCRATCH\EXE3.DAT

```

5.1 Primeira Instrução

Instrução opcional utilizada em todo início de arquivo para sinalizar o início de um novo caso (pode ser utilizada também como separação de casos em arquivos contendo vários casos). Para maiores detalhes ver item II-A do ATP Rule Book, Optional Case-Separation Card.

A segunda linha é um comentário (C na coluna 1 seguido de branco na coluna 2), utilizado para identificação do arquivo. Todas as colunas a partir da coluna 3 podem ser utilizadas para o texto referente ao comentário.

5.2 Primeiro Grupo de Informações - Miscellaneous Data Cards

```

-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----+
C DADOS MISCELANEOS
  10.E-5  10.E-2    60.    60.
    100    1      1      1      1      1

```

São as primeiras instruções obrigatórias e contém dados miscelâneos de ponto flutuante para o processamento do caso e dados inteiros para a especificação básica de saída de resultados.

Na primeira linha de informações se encontram o intervalo de integração (DELTAT), tempo total de simulação (TMAX), frequência para definição dos parâmetros referentes às indutâncias (XOPT) e às capacitâncias (COPT), tolerâncias (EPSILN e TOLMAT) e tempo para reiniciar um caso (TSTART).

Neste caso foi especificado um DELTAT de 100 microssegundos e um TMAX de 100 milissegundos pelas razões já expostas anteriormente no item 5.4.

O valor especificado para XOPT e COPT foi 60 (Hz), o que significa que os valores especificados para as indutâncias e para as capacitâncias serão interpretados pelo ATP como sendo em ohms e micromhos, respectivamente.

Os demais parâmetros EPSILN e TSTART não foram especificados e, portanto, o ATP assume valores "default" para os mesmos, o que ocorre na maioria dos casos com relação a estes parâmetros (item II-B do ATP Rule Book, Floating-point Miscellaneous Data Card).

A segunda instrução obrigatória contém a quantidade de pontos para impressão (IOUT), a quantidade de pontos para gráficos (IPLOT) e os "flags" para impressão da tabela de conexões (IDOUBL), dos fluxos nos ramos da rede (KSSOUT), dos valores máximos das variáveis (MAXOUT), das mudanças da frequência de impressão (IPUN), do controle de gravação da memória do ATP em disco para uso subsequente com "START AGAIN" (MENSAV), da gravação permanente de pontos para posterior plotagem (ICAT), do número de energização em casos de chaves estatísticas ou sistemáticas (NENERG) e do controle de impressão de diagnóstico (IPRSUP).

Neste caso foi especificado que a frequência de saída é de 1000 em 1000 pontos (IOUT = 1000), que todos os pontos são disponíveis para a saída gráfica (IPLOT = 1), que serão impressos a tabela de conexões (IDOUBL = 1), os fluxos nos ramos da rede (KSSOUT = 1) e os valores máximos das variáveis (MAXOUT = 1) e que serão gravados pontos para plotagem (ICAT = 1).

Os demais parâmetros IPUN, MENSAV, NENERG e IPRSUP não foram especificados, pois não se aplicam ao presente caso (item II-B do ATP Rule Book, Integer Miscellaneous Data Card).

5.3 Ramos Lineares e Não Lineares.

```
-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----+
C ELEMENTOS R L C ACOPLADOS
  1    1A    2A           4.487542.254104.41
  2    1B    2B           3.299818.110-7.6654.487542.254104.41
BLANK CARD ENDING BRANCH CARDS
```

Os elementos que compõem a rede elétrica no presente caso são os circuitos paralelos de uma linha de transmissão, a qual será representada pelo modelo " π " do ATP, adequado para linhas de transmissão onde o acoplamento entre circuitos deve ser representado ou quando se utiliza uma

cadeia de " π 's".

Foi especificada uma matriz 2x2, constituída por resistências, reatâncias e admitâncias próprias e mútuas, correspondendo ao " π " entre os nós 1 e 2, uma vez que a representação compreende somente uma fase de cada circuito (item IV-B do ATP Rule Book, Branch cards for mutually coupled RLC elements).

5.4 Chaves de Terra

```

-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----+-----8
C INTERRUPTORES
          1B          -1.          1.          3
          2B          -1.          1.          3
BLANK CARD ENDING SWITCH CARDS

```

As chaves de terra do presente estudo correspondem ao modelo de chave simples tempo-controlada do ATP.

Foram especificadas duas chaves simples (ITYPE = 0), uma entre os nós 1B e TERRA e a outra, entre 2B e TERRA, que se encontravam fechadas em regime permanente (TCLOSE = -1), assim permanecendo até o final do processamento (TOPEN = 1). Na coluna 80 é especificado o valor 3 correspondente a solicitação de saída de corrente e através das chaves (item VI do ATP Rule Book, Switch Cards).

5.5 Fontes.

```

-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----+-----8
C FONTES
14    1A    408248.29      60.      0.00      -1.0
14    2A    408248.29      60.     -7.00     -1.0
BLANK CARD ENDING SOURCE CARDS

```

As fontes de alimentação do circuito foram representadas pelo modelo de fonte de tensão senoidal, tipo 14 do ATP, conectadas aos nós 1A e 2A, de amplitude igual a 408248,29 volts, frequência de 60 Hz e ângulo de fase igual a 0 e -7 graus, respectivamente. O valor do parâmetro TSTART igual a -1 significa que as fontes já se encontravam ligadas no regime permanente e o parâmetro TSTOP igual a 0, que as fontes permanecem ligadas até o fim da simulação (item VII-A do ATP Rule Book, Static Electric Network Source Functions).

```

-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----+-----8
8
          1A    2A    1B    2B
BLANK CARD ENDING OUTPUT CARDS

```

5.6 Especificação para Saída.

Em complemento às opções existentes na maioria dos componentes da rede elétrica para as variáveis dos ramos (coluna 80 em cada componente), há a possibilidade de se especificar todos os tipos de variáveis nesta parte do arquivo. Geralmente estas informações são utilizadas somente para as tensões dos nós. No presente caso, foram especificadas as tensões dos nós 1A, 2A, 1B, 2B (item XII do ATP - Rule Book, Output - Variable Specification Cards).

5.7 Informações Complementares

```
-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----+-----8
BLANK CARD ENDING PLOT CARDS
BLANK CARD ENDING CASE
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK CARD ENDING ALL CASES
```

É necessária uma linha em branco para terminar o caso, seguida de outra linha, com a declaração BEGIN NEW DATE CASE e de mais outra linha em branco.

Os comentários são inseridos no arquivo de dados através de um C na coluna 1 e um espaço na coluna 2 de cada linha de comentário. O ATP interpreta a palavra BLANK (a partir da coluna 1) como se a instrução estivesse em branco e o restante da linha pode também ser utilizado como comentário.

Bibliografia

- (1) "Equipamentos Elétricos: Especificação em Subestações de Alta Tensão" - O. Kastrup Fº et alii, Editora da Universidade Federal Fluminense (capítulo IX), 1985.
- (2) - Amon F., J., Kastrup F., O. - "Interrupção de Corrente por Secionadores: Uma condição Operativa Freqüente, só agora abordada pelas Normas Técnicas" - X SNPTEE - Curitiba - 1989.
- (3) - Frontin, S. O., Kastrup F., O., Marcuzzi, E., Faingelernt A. - "Interruption of Induced Currents by Grouding Switches at the HVAC Lines of the Itaipu HVDC Transmission System Converter Stations" - CIGRÉ 1984.
- (4) - "Correntes induzidas em Circuito Paralelos de Linhas de Transmissão e seus Efeitos nas Chaves de Aterramento" - Jorge Amon Filho - Seminário Internacional da CIER, Montevideo, 1980.
- (5) - "Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento - Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão" - livro técnico publicado por FURNAS/UFF, 1987 - AMON F., J. e outros - CAP. 20
- (6) - "Amendment to IEC Publication 129 (1984): Alternating Current Disconnectors and Earthing Switches - Induced Current Switching by Earthing Switches" - Documento 17 A (Secretariat) 269, março 1987.

2A	405205.26915365	408248.29	-1436.905701349	1436.9180468815	-.29126905536E9	.293309667755E9
	-49752.95104857	-7.0000000	5.9564155001347	179.7624928	.345383640373E8	-0.9930428

Card of names for time-step loop output. | 1A 2A 1B 2B
Blank card ending requests for output variables. |BLANK CARD ENDING OUTPUT CARDS

Column headings for the 8 EMTF output variables follow. These are divided among the 5 possible classes as follows ...
First 6 output variables are electric-network voltage differences (upper voltage minus lower voltage);
Next 2 output variables are branch currents (flowing from the upper node to the lower node);

Step	Time	TERRA	1B	TERRA	1A	2A	1B	2B	TERRA	1B	TERRA
***		Phasor I(0) = -6.2238301E+02					Switch "	"	to "	1B"	closed in the steady-state.
***		Phasor I(0) = -6.2219233E+02					Switch "	2B"	to "	"	closed in the steady-state.
0	.00	0.0	0.0	0.0	408248.29	405205.269	0.0	0.0	-622.38301	-622.19233	
100	.01	0.0	0.0	0.0	-330279.8	-357062.1	0.0	0.0	525.859751	527.538121	
200	.02	0.0	0.0	0.0	126155.66	172533.183	0.0	0.0	-228.73379	-231.64021	
300	.03	0.0	0.0	0.0	126155.66	77897.4461	0.0	0.0	-155.99908	-152.97484	
400	.04	0.0	0.0	0.0	-330279.8	-298573.9	0.0	0.0	480.932715	478.945739	
500	.05	0.0	0.0	0.0	408248.29	405205.269	0.0	0.0	-622.35239	-622.16171	
600	.06	0.0	0.0	0.0	-330279.8	-357062.1	0.0	0.0	525.894479	527.57285	
700	.07	0.0	0.0	0.0	126155.66	172533.183	0.0	0.0	-228.69923	-231.60565	
800	.08	0.0	0.0	0.0	126155.66	77897.4461	0.0	0.0	-155.96685	-152.94262	
900	.09	0.0	0.0	0.0	-330279.8	-298573.9	0.0	0.0	480.961644	478.974668	
* * * * * Final time step, PLTFIL dumps plot data to ".PL4" disk file.											
Done dumping plot points to C-like disk file.											
1000	0.1	0.0	0.0	0.0	408248.29	405205.269	0.0	0.0	-622.32703	-622.13635	

Extrema of output variables follow. Order and column positioning are the same as for the preceding time-step loop output.

Variable maxima :	0.0	0.0	408248.29	408245.803	0.0	0.0	623.442683	623.448158
Times of maxima :	0.0	0.0	0.0	.017	0.0	0.0	.0585	.0585
Variable minima :	0.0	0.0	-408248.29	-408245.8	0.0	0.0	-623.53736	-623.54279
Times of minima :	0.0	0.0	.025	.042	0.0	0.0	.0335	.0335

Blank card terminating all plot cards. |BLANK CARD ENDING PLOT CARDS

Actual List Sizes for the preceding solution follow. 14-Sep-94 11.12.09

Size 1-10:	5	2	3	2	8	2	6	0	0	0
Size 11-20:	0	8	-9999	-9999	-9999	0	0	0	23	0
Size 21-29:	0	0	8	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	
Seconds for overlays 1-5 :	6.262	0.000	6.262	---	(CP: I/O; tot)					
Seconds for overlays 6-11 :	1.043	0.000	1.043							
Seconds for overlays 12-15 :	0.551	0.000	0.551							
Seconds for time-step loop :	1.152	0.000	1.152							
Seconds after DELTAT-loop :	0.223	0.000	0.223							

Totals :	9.230	0.000	9.230							

Capítulo VI

Energização de Linhas de Transmissão

1. Introdução

A finalidade básica deste item é a apresentação dos modelos existentes no ATP para a representação de linhas de transmissão. Para alcançar este objetivo optou-se pela manobra de energização de uma linha de transmissão, como referência para apresentação do modelo em questão.

A energização de uma linha de transmissão normalmente é efetuada através do fechamento de um disjuntor, o qual pode ser equipado com resistores de pré-inserção, dependendo do nível de tensão da linha de transmissão, para diminuir as sobretensões transitórias associadas a esta manobra.

As sobretensões transitórias resultantes podem alcançar valores elevados, principalmente no terminal aberto ao final da linha de transmissão. Os valores são estatísticos porque dependem dos instantes de fechamento dos contatos de cada fase do disjuntor.

O conhecimento das sobretensões transitórias estatísticas é importante para o projeto de coordenação de isolamento da linha de transmissão.

2. Características das Sobretensões Transitórias

As sobretensões transitórias decorrentes de uma energização de uma linha de transmissão envolvem basicamente um processo de propagação de ondas, superposto à tensão na frequência industrial.

Pode-se afirmar que as sobretensões são caracterizados por duas componentes principais:

Componente na Frequência Industrial

O efeito Ferranti faz com que a tensão aumente ao longo da linha de transmissão. Na ausência de compensação reativa, a tensão de regime no final da linha de transmissão é sempre maior do que no início.

O surto injetado durante o fechamento do disjuntor tem uma taxa de crescimento correspondente a que existe na frequência industrial e uma amplitude que depende do instante de fechamento.

⇒ Componente Transitória

No instante de fechamento dos contatos do disjuntor são injetados nas fases três surtos de tensão que se propagam pela linha de transmissão, praticamente na velocidade da luz, e que são fortemente afetados pela resistência da linha de transmissão e pelas características dos componentes conectados nas suas duas extremidades. As terminações da linha de transmissão definem os coeficientes de reflexão e as taxas de crescimento dos surtos refletidos.

A frequência dominante da componente transitória é definida pelo comprimento da linha de transmissão. Por este motivo quanto maior o comprimento menor é a frequência dominante e vice-versa.

Com o objetivo de ilustrar os aspectos acima apresentados será considerado como exemplo o sistema da Figura 1, onde uma linha de transmissão monofásica de 150 km é energizada a partir de uma fonte ideal (barra infinita).

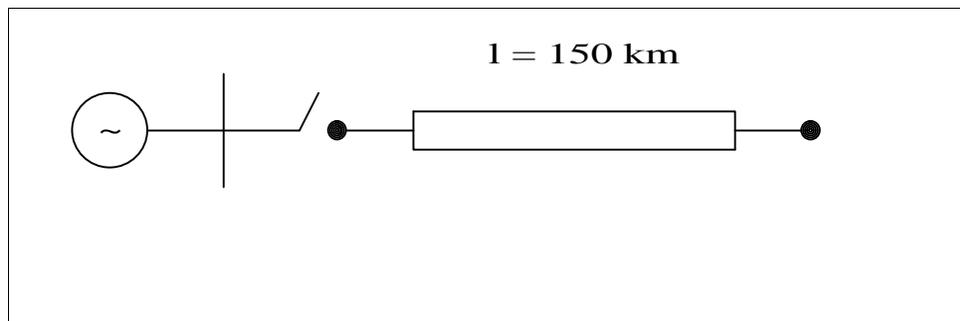


Figura 1 - Circuito básico para energização de uma linha de transmissão.

Os resultados obtidos para a tensão transitória no final da linha são apresentados na Figura 2, para as seguintes condições.

caso ideal, com fonte constante sem perdas e linha de transmissão sem perdas.

idem caso a, incluindo-se as perdas da linha de transmissão.

idem caso b, porém com fonte senoidal.

idem caso c, porém acrescentando-se uma indutância em série com a fonte.

idem caso d, porém sendo a linha de transmissão trifásica.

Nos casos abaixo observa-se a evolução na forma de onda da sobretensão transitória, bem como na sua amplitude, desde o caso puramente acadêmico até um caso mais próximo de uma condição real.

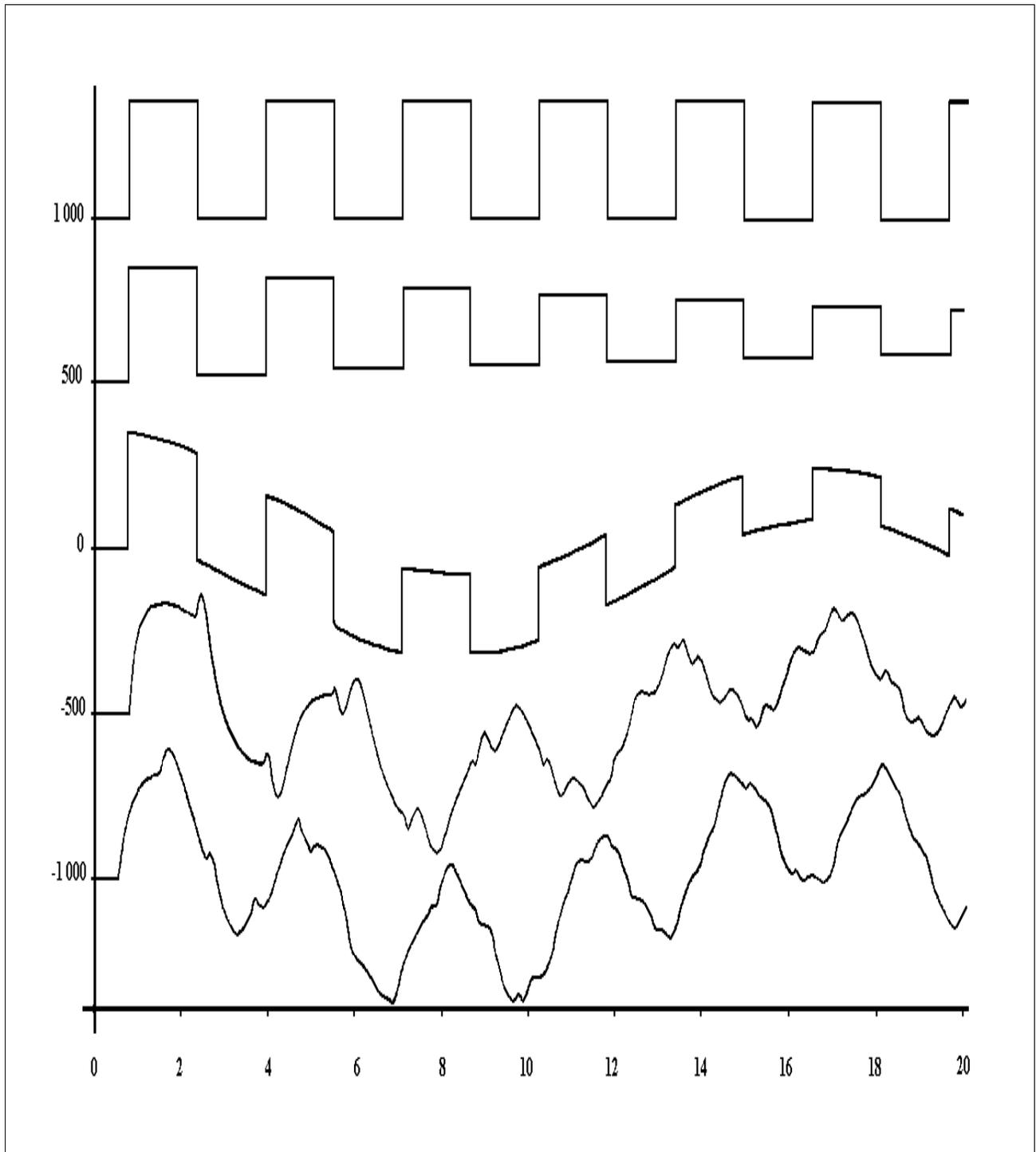


Figura 2 - Sobretensões Resultantes para Energização de uma Linha de Transmissão

Geralmente a sobretensão transitória decorrente de manobra de energização de uma linha de transmissão apresenta um pico logo ao início da onda e o fenômeno transitório é fortemente amortecido.

Os valores resultantes ao final da linha de transmissão são mais elevados do que no seu início. A presença de pára-raios de ZnO pode limitar acentuadamente as sobretensões no fim da linha de transmissão.

As sobretensões transitórias em questão são afetadas pelas seguintes condições do sistema elétrico:

características do chaveamento (dispersão entre contatos do disjuntor, magnitude e tempo de permanência do resistor de pré-inserção e instante de fechamento na onda de tensão na frequência industrial).

características da linha de transmissão (comprimento, parâmetros elétricos, grau de compensação da linha e presença de pára-raios).

características do sistema alimentador (potência de curto-circuito e equipamentos e linhas conectados à barra de chaveamento).

3. Modelagem de Linhas de Transmissão no ATP

3.1 Generalidades

As linhas de transmissão podem ser modeladas de duas formas distintas no ATP:

cadeia de PI's

parâmetros distribuídos

Geralmente a modelagem por parâmetros distribuídos é a utilizada na maioria dos casos. A modelagem por PI's é a tradicionalmente utilizada nos simuladores analógicos (TNA) e, apesar de permitir a obtenção de resultados similares à representação por parâmetros distribuídos no ATP, tem a sua utilização restrita aos casos onde há necessidade da modelagem de circuitos paralelos com acoplamento entre si.

A modelagem por parâmetros distribuídos pode considerar também a variação dos parâmetros com a frequência. Para facilitar a apresentação do modelo de linha de transmissão será considerado apenas a opção com os parâmetros distribuídos a frequência constante.

3.2 Caso Exemplo

Com o objetivo de exemplificar a modelagem de linhas de transmissão no ATP, utilizou-se o sistema mostrado na Figura 3 abaixo.

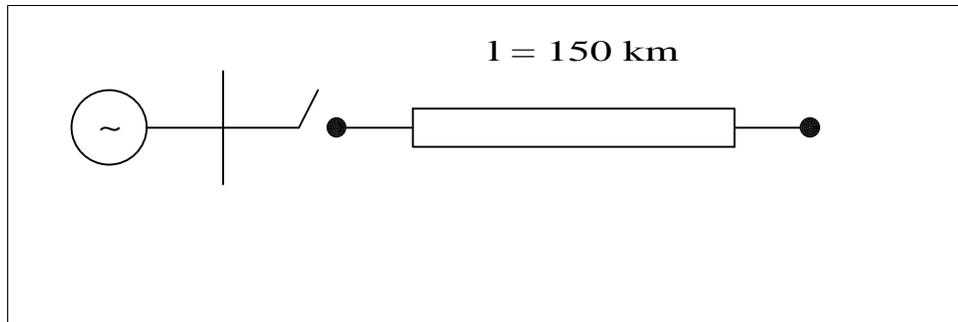


Figura 3 - Energização de uma Linha de Transmissão a Partir de uma Fonte Indutiva.

Os dados correspondentes ao circuito da Figura 3 são os seguintes:

⇒ gerador

potência 100 MVA 3 ϕ

impedâncias (base 100 MVA, 13,8 kV)

$$x''d = 20\% = 1,008 \text{ mH}$$

$$x_o = 8\% = 0,398 \text{ mH}$$

⇒ transformador 230/13,8 kV

potência 100 MVA 3 ϕ

impedância (base 100 MVA, 230 kV)

$$X_{ps} = 10\% = 140,3 \text{ mH (230 kV)}$$

ligações Y-t / Δ

⇒ linha de transmissão

parâmetros

$$R_1 = 0,0657 \text{ ohm/km}$$

$$L_1 = 1,358 \text{ mH/km}$$

$$C_1 = 8,628 \text{ nF/km}$$

$$R_o = 0,4220 \text{ mW /km}$$

$$X_o = 4,353 \text{ mH/km}$$

$$C_o = 6,266 \text{ nF/km}$$

comprimento = 150 km

3.3 Arquivo de Dados do ATP

A Figura 4 mostra a entrada de dados para a simulação da energização de uma linha de transmissão a partir de uma fonte indutiva, correspondente ao sistema indicado na Figura 3.

```

BEGIN NEW DATA CASE                               Energização de Linhas de Transmissão
C Dados Miscelâneos                               File = ATP\SCRATCH\EXE4.DAT
10.E-06 0.020
      200      1      1      1      1      1
C Linhas de Transmissão Monofásicas - Impedância de Surto e Travel Time
-1  2A  3A      0.0 4.3536.3E-3150.0
-1  2B  3B      .422 4.3536.3E-3150.0
-1  2C  3C      .422 4.3536.3E-3150.0
-1  2D  3D      .422 4.3536.3E-3150.0
-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----+-----
C Linhas de Transmissão Trifásicas - Parametros R,L e C
-1  2E  3E      .422 4.3536.3E-3150.0
-2  2F  3F      .066 1.3588.6E-3150.0
-3  2G  3G
C Elementos R L C
      FD  1D      141.3
C Elementos R L Acoplados
51  FE  1E      140.3
52  FF  1F      141.3
53  FG  1G
BLANK CARD ENDING BRANCH CARDS
C Interruptores
-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----+-----
      FA  2A      0.0  1.0000
      FB  2B      0.0  1.0000
      FC  2C      0.0  1.0000
      1D  2D      0.0  1.0000
      1E  2E      0.0  1.0000
      1F  2F      0.0  1.0000
      1G  2G      0.0  1.0000
C Interruptores Auxiliares
      XFA  3A      -1.0  0.0000
      XFA  3G      -1.0  0.0000
BLANK CARD ENDING SWITCH CARDS
C Fontes
-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----+-----
14  FA      180000.  0.0001  0.0      -1.
14  FB      180000.  0.0001  0.0      -1.
14  FC      180000.  60.0    0.0      -1.
14  FD      180000.  60.0    0.0      -1.
14  FE      180000.  60.0    0.0      -1.
14  FF      180000.  60.0   -120.0   -1.
14  FG      180000.  60.0    120.0   -1.
C Fonte Auxiliar
14  XFA      0.001  1000.0  0.0      -1.
-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----+-----
BLANK CARD ENDING SOURCE CARDS
      3A  3B  3C
      3D  3E  3F
      3G
BLANK CARD ENDING OUTPUT CARDS
BLANK CARD ENDING PLOT CARDS
BEGIN NEW DATA CASE
    
```

Figura 4 - Arquivo de Dados para o Caso de Energização de Linhas de Transmissão

O arquivo apresentado na Figura 4 contém as seguintes informações:

3.3.1 Miscellaneous data cards

```

-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----+-----
BEGIN NEW DATA CASE
    
```

Instrução opcional utilizada em todo início de arquivo do ATP para sinalizar o início de um novo caso (item II-A do ATP Rule Book).

3.3.2 Floating-point Miscellaneous data card

```

-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----+-----
10.E-06 0.020
    
```

Primeira instrução obrigatória com dados para o processamento do caso, tais como: intervalo de integração, tempo total de simulação, frequências para definição dos parâmetros referentes às indutâncias e capacitâncias, tolerâncias e tempo para reiniciar um caso.

Neste caso foram especificados apenas o intervalo de integração (10 µs) e o tempo total de simulação (20 ms).

Os valores das indutâncias e capacitâncias serão especificados em millihenries e microfarads porque XOPT e COPT foram deixados em branco. Os demais parâmetros não foram especificados e valores "default" são assumidos, o que ocorre na grande maioria dos casos com relação a estes parâmetros. (item II-B do ATP Rule Book).

3.3.4 Integer Miscellaneous data card

```

-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----+-----
      200          1          1          1          1          1          1
    
```

Segunda instrução obrigatória com dados para a especificação básica da saída de dados, tais como: quantidade de pontos para impressão, quantidade de pontos para gráficos, tabela de conexão, fluxos nos ramos da rede, valores máximos das variáveis, etc...

Neste caso foi especificado que a frequência de saída é de 200 em 200 pontos, que todos os pontos são disponíveis para a saída gráfica e que a tabela de conexão, o fluxo nos componentes e os valores máximos serão impressos. Os demais parâmetros não foram especificados.

3.3.5 Linear and Non-linear Branch cards

Nas instruções que definem os componentes da rede elétrica existem dois tipos diferentes:

linha de transmissão com parâmetros distribuídos (frequência constante) - parâmetros Z e T

	1	2	3	4	5	6	7
-1	2A	3A	0.0	4.3536.3E-3150.0			
-1	2B	3B	.422	4.3536.3E-3150.0			
-1	2C	3C	.422	4.3536.3E-3150.0			
-1	2D	3D	.422	4.3536.3E-3150.0			

linha de transmissão com parâmetros distribuídos (frequência constante) - parâmetros R,L e C

	1	2	3	4	5	6	7
-1	2E	3E	.422	4.3536.3E-3150.0			
-2	2F	3F	.066	1.3588.6E-3150.0			
-3	2G	3G					

A linha de transmissão trifásica foi especificada pela opção associada aos parâmetros R,L e C, uma vez que o parâmetro ILINE foi deixado em branco. Os valores devem ser especificados em millihenties e microfarads por unidade de comprimento porque nos cartões iniciais os valores de XOPT e COPT foram especificados em branco.

As três linhas de instruções com os códigos -1, -2 e -3 contém os valores de Ro, Lo e Co, na primeira, e os valores de R1, L1 e C1, na segunda. A terceira linha contém somente os nomes das barras terminais da linha de transmissão. A seção IV-D do ATP Rule Book contém as informações completas a respeito da modelagem de linhas de transmissão.

ramos RL com acoplamento entre fases.

	1	2	3	4	5	6	7
51	FE	1E		140.3			
52	FF	1F		141.3			
53	FG	1G					

Este tipo de componente foi utilizado para a representação de uma reatância indutiva, que corresponde, no caso, às indutâncias do gerador e do transformador indicados na Figura 3.

As três linhas de instruções com os códigos 51, 52 e 53 contém os valores de L_0 , na primeira, e de L_1 , na segunda. A terceira linha contém somente os nomes das barras. Foi utilizado a opção com os parâmetros em componentes de seqüência zero e positiva, a qual é reconhecida pelo formato de entrada de dados (a terceira linha tem os campos de 15 a 80 deixados em branco). Informações adicionais estão na seção IV-C do ATP Rule Book.

3.3.6 Switch cards

		1	2	3	4	5	6	7
FA	2A	0.0	1.0000					
FB	2B	0.0	1.0000					
FC	2C	0.0	1.0000					
1D	2D	0.0	1.0000					
1E	2E	0.0	1.0000					
1F	2F	0.0	1.0000					
1G	2G	0.0	1.0000					

O fechamento de cada fase de cada disjuntor é simulado por uma chave monofásica com instantes de fechamento e de abertura especificados pelo usuário.

No caso em questão todas as fases fecham no instante zero e permanecem fechadas por todo o período da simulação, uma vez que foi especificado um tempo igual a 1.0 s, muito maior que o tempo total de simulação.

O último conjunto de três chaves corresponde ao disjuntor trifásico que energiza o sistema formado pela linha de transmissão trifásica.

Maiores detalhes podem ser obtidos na seção VI do ATP Rule Book.

3.3.7 Static Electric Network Sources

		1	2	3	4	5	6	7
14	FA	180000.	0.0001	0.0				-1.
14	FB	180000.	0.0001	0.0				-1.
14	FC	180000.	60.0	0.0				-1.
14	FD	180000.	60.0	0.0				-1.
14	FE	180000.	60.0	0.0				-1.
14	FF	180000.	60.0	-120.0				-1.
14	FG	180000.	60.0	120.0				-1.

O sistema tem como fontes de excitação várias fontes monofásicas senoidais, na frequência de 60 Hz, defasadas de 120 graus, com amplitude igual a tensão fase-terra (valor de pico em volts) e ativadas durante o cálculo da solução em regime permanente (TSTART negativo). As últimas três fontes formam uma fonte trifásica equilibrada (defasagem de 120 o entre as fases e magnitudes iguais), a qual foi

utilizada na energização da linha de transmissão trifásica. Informações complementares encontram-se na seção VII do ATP Rule Book.

3.3.8 Output Specification cards

-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----+-----
3A 3B 3C
3D 3E 3F
3G

Em complemento às opções existentes na maioria dos componentes da rede elétrica para as variáveis dos ramos (coluna 80 em cada componente) há a possibilidade de se especificar todos os tipos de variáveis nesta parte do arquivo. Geralmente se utiliza esta parte do arquivo somente para a especificação das tensões das barras.

3.3.9 Informações Complementares

-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----+-----
BLANK CARD ENDING OUTPUT CARDS
BLANK CARD ENDING PLOT CARDS
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK CARD ENDING CASES

Com exceção do conjunto de informações para os outros itens acima, todos os demais grupos de instruções são terminados por uma instrução em branco.

A terminação do caso deve ser realizada com um outro BEGIN NEW DATA CASE, seguido de um outro cartão em branco.

Os comentários são inseridos no arquivo através de Cb antes do comentário propriamente dito. (C na coluna 1 e "branco" na coluna 2 ao início de cada linha de comentário).

O ATP interpreta a palavra BLANK (a partir da coluna 1) como se a instrução estivesse em branco e o restante do cartão pode ser utilizado como comentário, tal como utilizado no arquivo mostrado na Figura 4 acima. Desta forma cada conjunto de elementos pode ser claramente identificado utilizando-se o cartão de separação também como cartão de comentário.

3.4 Listagem do ATP correspondente ao arquivo mostrado na Figura 4

A listagem correspondente ao arquivo mostrado na Figura 4 encontra-se nas páginas 16, 17 e 18 deste capítulo.

ANEXO I

Modelagem de Linhas de Transmissão no ATP

1. Modelos Disponíveis para Linhas de Transmissão

O ATP dispõe de modelos para linhas de transmissão cobrindo as seguintes alternativas:

- ⇒ modelos baseados em parâmetros distribuídos sem variação com a frequência, para linhas de transmissão transpostas ou não-transpostas.
- ⇒ modelos baseados em parâmetros distribuídos e variação com a frequência.
- ⇒ modelos baseados em cadeias de PI's

A modelagem de linhas de transmissão geralmente é realizada utilizando-se parâmetros distribuídos, com ou sem variação com a frequência.

A modelagem por cadeias de PI's apresenta resultados similares, desde que o comprimento de cada seção PI seja adequado ao fenômeno transitório em análise mas, na prática, costuma ser utilizada somente nos casos onde é necessário representar o acoplamento entre circuitos paralelos.

A modelagem por parâmetros distribuídos variando com a frequência é a mais completa disponível no ATP, mas também apresenta simplificações porque uma solução rigorosa necessitaria de um modelo generalizado de variação dos parâmetros com a frequência, baseado em matrizes de transformação dependentes da frequência.

No ATP a matriz de transformação é constante e real. Para circuitos perfeitamente transpostos, a matriz de transformação é real e não dependente de frequência, e para circuitos não-transpostos a matriz de transformação é complexa e dependente com a frequência. Entretanto, para uma ampla gama de frequências as matrizes podem ser consideradas praticamente como constantes e reais, o que é realizado no ATP.

2. Parâmetros Distribuídos sem Variação com a Frequência (seção IV- d.1 do ATP Rule Book).

O modelo para parâmetros distribuídos a frequência constante pode ser sem distorções ("distortionless") ou com resistências concentradas no meio e nas extremidades da linha de transmissão.

Uma linha de transmissão é considerada sem distorções se a relação $R/L = G/C$ é válida. Na prática as perdas resistivas são muito maiores que as perdas por dispersão e esta condição não é obtida, a não ser em circuitos de comunicação.

A consideração de resistências concentradas no meio e nas extremidades da linha de transmissão 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.

2.1 Formatos

Basicamente há dois formatos disponíveis: o formato normal e o de precisão estendida.

No formato normal os parâmetros necessários para a especificação do modelo são os seguintes:

												1				2				3				4				5				6				7				8			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0				
node names		ref. branches				resist. ohm/length		A		B		length		2		3		4		1. ITYPE				4. IPOSE																			
BUS1		BUS2		BUS3		BUS4														2. ILINE				5. IOUT																			
I2 A6		A6		A6		A6		E6.2		E6.2		E6.2		E6.2		I2		I2		I2		3. IPUNCH																					

ITYPE (1)

indica a seqüência das fases, sendo necessário inserir os dígitos -1, -2, -3,... -N nas colunas 1 e 2 de cada fase.

BUS1, BUS2

nomes das barras das extremidades da linha de transmissão nas colunas 3 a 8 e 9 a 14, respectivamente.

BUS3, BUS4

nomes de referência, caso os parâmetros sejam copiados de outra linha de transmissão já especificada no caso, nas colunas 15 a 20 e 21 a 26.

Resistance (R)

valor da resistência em ohms por unidade de comprimento, nas colunas 27 a 32.

A(col.33 a 38)

valor dependente da variável ILINE. Para ILINE = 0 deve ser especificada a indutância (se XOPT = 0) modal em millihenties por unidade de comprimento ou a reatância modal (se XOPT > 0) em ohms por unidade de comprimento. Para ILINE = 1 ou 2 deve ser especificada a impedância de surto modal em ohms.

B(col. 39 a 44)

valor dependente da variável ILINE.

Para ILINE = 0 deve ser especificada a capacitância modal em microfarads por unidade de comprimento (se COPT = 0) ou a suscetância modal em micromhos por unidade de comprimento (se COPT . 0).

Para ILINE = 1 deve ser especificada a velocidade de programação modal em unidades de comprimento por segundo e para ILINE = 2 deve ser especificado o tempo de propagação modal em segundos.

LENGHT (L)

comprimento da linha de transmissão nas colunas 45 a 50, em unidades compatíveis com os parâmetros R, A e b acima. No caso de linhas não-transpostas o comprimento tem que ser especificado como negativo.

ILINE (2)

indicador do tipo de especificação para os parâmetros A e B, na coluna 52.

IPUNCH (3)

indicador do tipo de modelagem, na coluna 54. Para uma linha de transmissão com resistência concentrada no meio e nas extremidades (caso usual), IPUNCH = 0. Para linhas sem distorções IPUNCH = 1.

IPOSE (4)

indicador do tipo de transposição, na coluna 56. IPOSE = 0 para linhas perfeitamente transpostas e IPOSE = N para linhas não transpostas, sendo N o número de "fases".

IOUT (5)

indicador do tipo de variável solicitada como resultado de saída. Não se deve especificar este parâmetro porque existe um problema no ATP que interfere nos resultados, caso este parâmetros seja especificado.

No formato estendido os campos de R (resistance), A, B e LENGHT foram aumentados, de forma a permitir uma quantidade maior de dígitos, e os demais deslocados. Todos os parâmetros tem o mesmo significado e os novos campos são os seguintes:

R ---- colunas 27 a 38
 A ---- colunas 39 a 50
 B ---- colunas 51 a 62

LENGTH ---- colunas 63 a 74
 ILINE ---- coluna 76
 IPUNCH ---- coluna 78
 IPOSE ---- coluna 79

1										2										3										4										5										6										7										8									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0										
node names		1 ITYPE		resistence		A		B		length		2		3		4		5																																																													
BUS1		BUS2		2 ILINE		ohm/length																																																																									
				3 IPUNCH		E6.2		E6.2		E6.2		E6.2		12		12																																																															
12		A6		A6		4 IPOSE																																																																									
				5 IOUT																																																																											

Para uma linha de transmissão trifásica perfeitamente transposta existe apenas dois modos distintos de propagação, usualmente denominados de seqüência zero e seqüência positiva, uma vez que a seqüência negativa é idêntica a seqüência positiva.

A modelagem da linha de transmissão transposta, apesar da necessidade de um conjunto de três instruções (uma para cada fase), requer a especificação dos parâmetros indicados acima somente para as duas primeiras fases. Na terceira fase é necessário indicar apenas o código -3 e os nomes das barras terminais.

Os parâmetros correspondentes ao modo zero são indicados na primeira linha (código -1) e os de modo positivo na segunda linha (código -2). No caso de uma linha de transmissão monofásica só existe o modo zero.

No caso de uma linha de transmissão não-transposta ($IPOSE = N$) existem N modos de propagação diferentes e há necessidade de se especificar também a matriz de transformação logo em seguida às informações sobre as fases.

Neste caso é mais seguro utilizar diretamente o arquivo de saída da rotina LINE CONSTANTS, o qual contém todos os parâmetros sobre as fases e a matriz de transformação. Deve haver consistência entre as informações geradas pelo LINE CONSTANTS e os parâmetros XOPT e COPT, uma vez que ILINE já vem especificado como sendo igual a 1.

Em complementação às informações acima ainda há um modelo para linhas de circuito duplo, onde os circuitos são transpostos, mas não é realizada a transposição entre os circuitos, que é o caso usual para linhas de transmissão na mesma faixa de passagem.

Neste caso a matriz de transformação apresenta acoplamento entre as componentes de seqüência zero de cada circuito e há três modos de propagação distintos. Esta modelagem não é muito utilizada na prática. A seção IV.d.2 do ATP Rule Book apresenta as informações necessárias para este tipo de modelo.

3. Parametros Distribuídos com Variação com a Frequência

Os parâmetros de uma linha de transmissão dependem da frequência, como pode ser observado na Figura 1, principalmente para a seqüência zero.

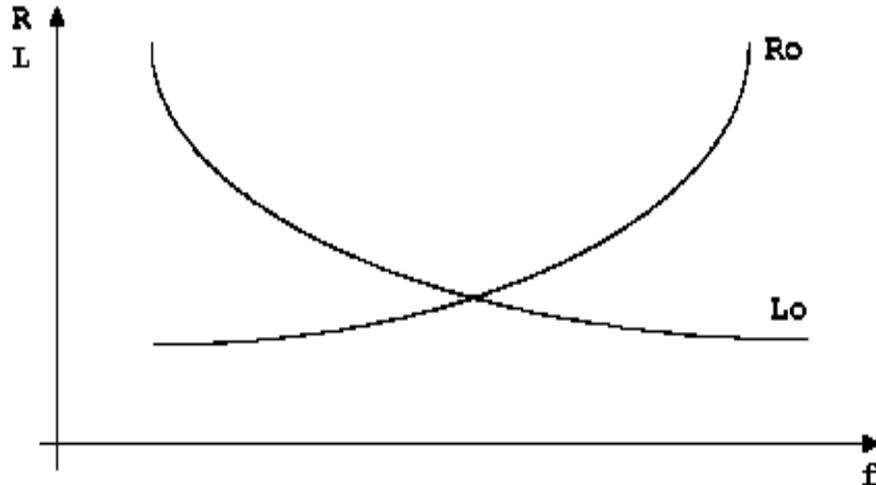


Figura 1 - Variação dos Parâmetros de uma Linha de Transmissão com a Frequência.

A modelagem rigorosa de linhas de transmissão deve incluir a variação dos parâmetros com a frequência, de forma a evitar imprecisões nos resultados. Na prática a inclusão desta dependência apresenta uma complexidade de tal ordem que é necessário introduzir simplificações na modelagem para torná-la compatível com os métodos computacionais utilizados no programa.

O programa ATP permite a modelagem de linhas de transmissão com a variação dos parâmetros com a frequência através de duas opções: modelos JMARTI e Semlyem, Os quais utilizam técnicas distintas para alcançar o mesmo objetivo.

As informações para utilização do modelo JMARTI estão na seção IV.d.3 e para o modelo SEMLYEM na seção IV.d.4 (ATP Rule Book). Na prática, a utilização de qualquer dos dois modelos em questão deve ser realizada através do processamento das rotinas auxiliares JMARTI (seção XVII) e SEMLYEM (seção XXII), as quais permitem a criação dos arquivos com as informações necessárias para os modelos JMARTI e SEMLYEM. Devido a grande quantidade de dados este procedimento, além de facilitar, também garante a segurança na manipulação das informações.

Energização de Linhas de Transmissão

Alternative Transients Program (ATP), Salford 386 translation. Copyright 1987. Use licensed only by LEC (K.U. Leuven, Belgium).
 Date (dd-mth-yy) and time of day (hh.mm.ss) = 14-Sep-94 11.14.06 Name of disk plot file, if any, is C:\EXE4.pl4
 For information, consult the copyrighted ATP EMTF Rule Book published by LEC in July, 1987. Last major program update: Oct, 1990
 Total length of "LABCOM" tables = 2251555 INTEGER words. "VARDIM" List Sizes follow : 5002 6000 10000 1000 50000
 800 14000 35000 1500 3200 1000 1000100000 400 64800 800 80 100 32000 13200 2000 3000 80000 60 8000 1680 20

Descriptive interpretation of input data cards. | Input data card images are shown below, all 80 columns, character by character
 0 1 2 3 4 5 6 7 8
 01234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

```

-----+-----
Comment card. KOMPAN = 1. | C data:EXE4.DAT
Marker card preceding new EMTF data case. | BEGIN NEW DATA CASE
Comment card. KOMPAN = 1. | C ENERGIZACAO DE LINHAS DE TRANSMISSAO FILE = ATP\SCRATCH\EXE4.DAT
Comment card. KOMPAN = 1. | C -----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
Comment card. KOMPAN = 1. | C DADOS MISCELANEOS
Misc. data. 1.000E-05 2.000E-02 0.000E+00 | 10.E-06 0.020
Misc. data. 200 1 1 1 1 0 0 1 0 0 | 200 1 1 1 1 1
Comment card. KOMPAN = 1. | C LINHAS DE TRANSMISSAO MODELADAS POR IMPEDANCIA DE SURTO E TRAVEL TIME
Comment card. KOMPAN = 1. | C LINHAS DE TRANSMISSAO MONOFASICAS
Comment card. KOMPAN = 1. | C -----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
0.000E+00 4.353E+00 6.300E-03 8.312E+02 7.855E-04 | -1 2A 3A 0.0 4.3536.3E-3150.0
4.220E-01 4.353E+00 6.300E-03 8.312E+02 7.855E-04 | -1 2B 3B .422 4.3536.3E-3150.0
4.220E-01 4.353E+00 6.300E-03 8.312E+02 7.855E-04 | -1 2C 3C .422 4.3536.3E-3150.0
4.220E-01 4.353E+00 6.300E-03 8.312E+02 7.855E-04 | -1 2D 3D .422 4.3536.3E-3150.0
Comment card. KOMPAN = 1. | C LINHA DE TRANSMISSAO TRIFASICA
4.220E-01 4.353E+00 6.300E-03 8.312E+02 7.855E-04 | -1 2E 3E .422 4.3536.3E-3150.0
6.600E-02 1.358E+00 8.600E-03 3.974E+02 5.126E-04 | -2 2F 3F .066 1.3588.6E-3150.0
3rd or later transposed distributed phase. | -3 2G 3G
Comment card. KOMPAN = 1. | C -----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
Comment card. KOMPAN = 1. | C ELEMENTOS R L C
Series R-L-C. 0.000E+00 1.413E-01 0.000E+00 | FD 1D 141.3
Comment card. KOMPAN = 1. | C ELEMENTOS R L ACOPLADO
1st of coupled R-L. 0.00000E+00 1.40300E-01 | 51 FE 1E 140.3
0.000E+00 1.413E-01 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 | 52 FF 1F 141.3
0.000E+00-3.333E-04 0.000E+00-3.333E-04 0.000E+00 | 53 FG 1G
Blank card ending branches. IBR, NTOT = 11 23 | BLANK CARD ENDING BRANCH CARDS
Comment card. KOMPAN = 1. | C INTERRUPTORES
Comment card. KOMPAN = 1. | C -----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
Switch. 0.00E+00 1.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 | FA 2A 0.0 1.0000
Switch. 0.00E+00 1.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 | FB 2B 0.0 1.0000
Switch. 0.00E+00 1.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 | FC 2C 0.0 1.0000
Switch. 0.00E+00 1.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 | 1D 2D 0.0 1.0000
Switch. 0.00E+00 1.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 | 1E 2E 0.0 1.0000
Switch. 0.00E+00 1.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 | 1F 2F 0.0 1.0000
Switch. 0.00E+00 1.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 | 1G 2G 0.0 1.0000
Comment card. KOMPAN = 1. | C INTERRUPTORES AUXILIARES
Switch. -1.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 | XFA 3A -1.0 0.0000
Switch. -1.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 | XFA 3G -1.0 0.0000
Blank card ending switches. KSWTCH = 9. | BLANK CARD ENDING SWITCH CARDS
Comment card. KOMPAN = 1. | C FONTES
Comment card. KOMPAN = 1. | C -----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
Source. 1.80E+05 1.00E-04 0.00E+00 -1.00E+00 | 14 FA 180000. 0.0001 0.0 -1.
Source. 1.80E+05 1.00E-04 0.00E+00 -1.00E+00 | 14 FB 180000. 0.0001 0.0 -1.
Source. 1.80E+05 6.00E+01 0.00E+00 -1.00E+00 | 14 FC 180000. 60.0 0.0 -1.
Source. 1.80E+05 6.00E+01 0.00E+00 -1.00E+00 | 14 FD 180000. 60.0 0.0 -1.
Source. 1.80E+05 6.00E+01 0.00E+00 -1.00E+00 | 14 FE 180000. 60.0 0.0 -1.
Source. 1.80E+05 6.00E+01 -1.20E+02 -1.00E+00 | 14 FF 180000. 60.0 -120.0 -1.
Source. 1.80E+05 6.00E+01 1.20E+02 -1.00E+00 | 14 FG 180000. 60.0 120.0 -1.
Comment card. KOMPAN = 1. | C FONTE AUXILIAR
Source. 1.00E-03 1.00E+03 0.00E+00 -1.00E+00 | 14 XFA 0.001 1000.0 0.0 -1.
Comment card. KOMPAN = 1. | C -----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
Blank card ends electric network sources. | BLANK CARD ENDING SOURCE CARDS
    
```

List of input elements that are connected to each node. Only the physical connections of multi-phase lines are shown (capacitive and inductive coupling are ignored). Repeated entries indicate parallel connections. Switches are included, although sources (including rotating machinery) are omitted -- except that U.M. usage produces extra, internally-defined nodes "UMXXXX".

From bus name | Names of all adjacent busses.

2A	3A*	FA*
3A	2A*	XFA*
2B	3B*	FB*
3B	2B*	
2C	3C*	FC*
3C	2C*	
2D	3D*	1D*
3D	2D*	
2E	3E*	1E*
3E	2E*	
2F	3F*	1F*
3F	2F*	
2G	3G*	1G*
3G	2G*	XFA*
FD	1D*	
1D	2D*	FD*
FE	1E*	
1E	2E*	FE*
FF	1F*	
1F	2F*	FF*
FG	1G*	
1G	2G*	FG*
FA	2A*	
FB	2B*	
FC	2C*	
XFA	3A*	3G*

Pi-equivalent branches of distributed circuits are added to the table of List Size 3 between indices 8 and 17.

Sinusoidal steady-state phasor solution, branch by branch. All flows are away from a bus, and the real part, magnitude, or "P"

Energização de Linhas de Transmissão

is printed above the imaginary part, the angle, or "Q". The first solution frequency = 1.0000000E+03 Hertz.
 Added subnetwork frequencies : 1.000000E-04 6.000000E+01

Bus K	Bus M	Phasor node voltage		Phasor branch current		Power flow P and Q	Power loss P and Q
		Rectangular	Polar	Rectangular	Polar		
2A		.00451843938626	.00451843938626	0.0	.8470329473E-21	0.0	0.0
		0.0	0.0	-.847032947E-21	-90.0000000	.1913633515E-23	0.0000000
	3A	.1E-2	.1E-2	0.0	.53010160153E-5	0.0	0.0
		0.0	0.0	-.5301016015E-5	-90.0000000	.26505080077E-8	
2E		.42405249567E-3	.42415575532E-3	0.0	0.0	0.0	0.0
		.93587224255E-5	1.2642969	0.0	0.0	0.0	0.0
	3E	-.5280821255E-3	.52816086807E-3	0.0	0.0	0.0	0.0
		.91198274476E-5	179.0106166	0.0	0.0	0.0	0.0
2F		.42405249567E-3	.42415575532E-3	.8470329473E-21	.8470329473E-21	.1795932176E-24	-.749574393E-25
		.93587224252E-5	1.2642969	0.0	0.0	.3963573119E-26	0.0000000
	3F	-.5280821255E-3	.52816086807E-3	.8470329473E-21	.6828997942E-20	-.254550657E-24	
		.91198274478E-5	179.0106166	-.677626358E-20	-82.8749837	-.178534944E-23	
2G		-.0011087118279	.00110889261524	0.0	.1355252716E-19	-.13568017E-24	.2504886545E-10
		.20022859021E-4	178.9653753	-.135525272E-19	-90.0000000	-.751292358E-23	0.0000000
	3G	.1E-2	.1E-2	.50097730894E-7	.30913837447E-6	.2504886545E-10	
		0.0	0.0	.3050520479E-6	80.6737455	-.1525260239E-9	

***** FREQUENCY DISCONTINUITY. End branches excited at 1.00000000E+03 Hz, and begin those excited at 6.00000000E+01 Hz.

FD		180000.	180000.	0.0	0.0	0.0	0.0
		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1D		180000.	180000.	0.0	0.0	0.0	0.0
		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
FE		180000.	180000.	.2820339029E-16	.6496472408E-15	.2538305126E-11	-.139431165E-27
		0.0	0.0	.6490347496E-15	87.5118139	-.584131275E-10	0.0
1E		180000.	180000.	-.282033903E-16	.6496472408E-15	-.253830513E-11	
		-.149880108E-14	0.0000000	-.64903475E-15	-92.4881861	.5841312747E-10	
FF		-90000.	180000.	.6684851929E-19	.2738277609E-12	-.2134276475E-7	-.113737334E-23
		-155884.5726812	-120.0000000	.2738277609E-12	89.9999860	.12322244029E-7	0.0000000
1F		-90000.	180000.	-.668485193E-19	.2738277609E-12	.21342764754E-7	
		-155884.5726812	-120.0000000	-.273827761E-12	-90.0000140	-.1232224403E-7	
FG		-90000.	180000.	.6684851929E-19	.6490347531E-15	.5058424412E-10	-.184277907E-26
		155884.5726812	120.0000000	.6490347496E-15	89.9940987	.2921177406E-10	0.0
1G		-90000.	180000.	-.668485193E-19	.6490347531E-15	-.505842441E-10	
		155884.5726812	120.0000000	-.64903475E-15	-90.0059013	-.292117741E-10	

Total network loss P-loss by summing injections = 2.504886544692E-11
 Output for steady-state phasor switch currents.

Node-K	Node-M	I-real	I-imag	I-magn	Degrees	Power	Reactive
FA	2A	T-close at t=0+		T-close at t=0+		T-close at t=0+	
FB	2B	T-close at t=0+		T-close at t=0+		T-close at t=0+	
FC	2C	T-close at t=0+		T-close at t=0+		T-close at t=0+	
1D	2D	T-close at t=0+		T-close at t=0+		T-close at t=0+	
1E	2E	T-close at t=0+		T-close at t=0+		T-close at t=0+	
1F	2F	T-close at t=0+		T-close at t=0+		T-close at t=0+	
1G	2G	T-close at t=0+		T-close at t=0+		T-close at t=0+	
XFA	3A	0.0000000E+00	-5.30101602E-06	5.30101602E-06	-90.0000	0.0000000E+00	2.65050801E-09
XFA	3G	5.00977309E-08	3.05052048E-07	3.09138374E-07	80.6737	2.50488654E-11	-1.52526024E-10

Solution at nodes with known voltage. Nodes that are shorted together by switches are shown as a group of names, with the printed result applying to the composite group. The entry "MVA" is $\sqrt{P^2 + Q^2}$ in units of power, while "P.F." is the associated power factor.

Node name	Source Rectangular	node voltage Polar	Injected Rectangular	source current Polar	Injected P and Q	source power MVA and P.F.
FD	180000. 0.0	180000. 0.0	0.0 .1785238624E-12	.1785238624E-12 90.0000000	0.0 -.1606714761E-7	.16067147612E-7 0.0
FE	180000. 0.0	180000. 0.0	.4224051664E-15 -.266738021E-12	.266738355E-12 -89.9092667	.3801646498E-10 .2400642185E-7	.24006451952E-7 0.0015836

Energização de Linhas de Transmissão

```

FF      -90000.      180000.      -.23849759E-12  .3993793771E-12      -.1423625737E-7  .3594414394E-7
      -155884.5726812      -120.0000000      .3203479149E-12  126.6675186      .33004703599E-7      -.03960661

FG      -90000.      180000.      -.256461519E-12  .2601279793E-12      .1493287452E-7  .23411518135E-7
      155884.5726812      120.0000000      .4352074257E-13  170.3688302      -.1803076371E-7      0.6378431

FA      180000.      180000.      0.0      0.0      0.0      0.0
      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0

FB      180000.      180000.      0.0      0.0      0.0      0.0
      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0

FC      180000.      180000.      0.0      0.0      0.0      0.0
      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0

XFA
3A
3G      .1E-2      .1E-2      .50097730894E-7  .49962151421E-5      .2504886545E-10  .24981075711E-8
      0.0      0.0      -.4995963967E-5      -89.4254778      .24979819837E-8      0.0100271

Card of names for time-step loop output.      |      3A      3B      3C
Card of names for time-step loop output.      |      3D      3E      3F
Card of names for time-step loop output.      |      3G
Blank card ending requests for output variables.      |BLANK CARD ENDING OUTPUT CARDS
    
```

Column headings for the 7 EMTF output variables follow. These are divided among the 5 possible classes as follows

First 7 output variables are electric-network voltage differences (upper voltage minus lower voltage);

Step	Time	3A	3B	3C	3D	3E	3F	3G
***		Switch " FA" to " 2A" closed after 0.0000000E+00 sec.						
***		Switch " FB" to " 2B" closed after 0.0000000E+00 sec.						
***		Switch " FC" to " 2C" closed after 0.0000000E+00 sec.						
***		Switch " 1D" to " 2D" closed after 0.0000000E+00 sec.						
***		Switch " 1E" to " 2E" closed after 0.0000000E+00 sec.						
***		Switch " 1F" to " 2F" closed after 0.0000000E+00 sec.						
***		Switch " 1G" to " 2G" closed after 0.0000000E+00 sec.						
***	Phasor I(0) = 0.0000000E+00				Switch " XFA" to " 3A" closed in the steady-state.			
***	Phasor I(0) = 5.0097731E-08				Switch " XFA" to " 3G" closed in the steady-state.			
0	0.0	.1E-2	0.0	0.0	0.0	-.52808E-3	-.52808E-3	.1E-2
***						Open switch " XFA" to " 3G" after 3.0000000E-05 sec.		
***						Open switch " XFA" to " 3A" after 5.0000000E-04 sec.		
200	.002	359999.999	346916.423	311207.091	321817.218	311222.031	-20770.433	-290451.6
400	.004	359999.996	322909.291	157550.471	-116331.14	-70376.447	164338.06	-93961.612
600	.006	-.00450193	47670.8578	-255631.03	106535.883	-234630.16	274384.975	-39754.816
800	.008	359999.996	303424.375	-57512.154	-392034.77	-13607.498	9790.18847	3817.30948
1000	.01	.00106571	65547.493	-270679.91	-22985.775	-323255.	59541.3826	263713.622
1200	.012	.911362E-3	82718.3677	-136510.55	-110378.18	106381.222	-188120.94	81739.7184
1400	.014	360000.003	270078.986	192973.199	185938.127	69131.837	-204237.23	135105.39
1600	.016	.003973463	95371.1483	93671.3423	174557.49	48447.8628	-39400.656	-9047.2068
1800	.018	359585.756	258304.094	245093.238	147668.606	334245.359	-99582.342	-234663.02
<p>*** Final time step, PLTFIL dumps plot data to ".PL4" disk file. Done dumping plot points to C-like disk file.</p>								
2000	.02	360000.003	246220.007	128436.16	67431.6607	-83642.487	185360.399	-101717.91

Extrema of output variables follow. Order and column positioning are the same as for the preceding time-step loop output.

```

Variable maxima : 360000.005 346916.423 346668.649 364780.123 398824.155 276620.605 281759.672
Times of maxima : .00129 .00159 .8E-3 .00244 .00172 .00653 .01038
Variable minima : -.00450885 0.0 -300630.44 -403896.47 -381425.7 -297031.05 -306006.8
Times of minima : .00286 0.0 .00879 .00785 .00686 .0146 .00181
    
```

Blank card terminating all plot cards. |BLANK CARD ENDING PLOT CARDS

```

Actual List Sizes for the preceding solution follow.      14-Sep-94 11.14.18
Size 1-10:      27      11      17      8      73      9      22      506      0      0
Size 11-20:     0      7      -9999      -9999      -9999      0      0      0      23      0
Size 21-29:     26      0      38      0      -9999      -9999      -9999      -9999      -9999
Seconds for overlays 1-5 :      6.535      0.000      6.535      --- (CP: I/O: tot)
Seconds for overlays 6-11 :      2.199      0.000      2.199
Seconds for overlays 12-15 :      0.660      0.000      0.660
Seconds for time-step loop :      2.855      0.000      2.855
Seconds after DELTAT-loop :      0.219      0.000      0.219

-----
Totals :      12.469      0.000      12.469
    
```

Capítulo VII

Tensão de Restabelecimento Transitória

1. Fundamentos Teóricos

1.1 Introdução

A manobra de eliminação de falta num sistema elétrico de potência acarreta o aparecimento de sobretensões entre fase e terra e através dos contatos dos pólos do disjuntor manobrado (1).

O conhecimento das sobretensões entre fase e terra é importante para a especificação dos pára-raios que irão limitá-las a níveis compatíveis com a suportabilidade dos equipamentos por eles protegidos, drenando uma energia que esteja dentro do limite de sua capacidade de absorção.

No que se refere as sobretensões através dos contatos dos pólos do disjuntor manobrado, estas devem ser conhecidas para a correta especificação das suportabilidades dos disjuntores a este tipo de solicitação, também conhecida como Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT).

1.2 Interrupção da Falta e Aparecimento da TRT

Quando ocorre uma falta num sistema de potência, os disjuntores mais próximos devem isolar o trecho defeituoso o mais rápido possível, de forma a minimizar os feitos da falta sobre o restante do sistema.

A tensão de restabelecimento transitória (TRT) (2) é aquela que aparece através dos contatos de um mesmo polo do disjuntor após a extinção do arco elétrico no interior de sua câmara.

Para que a interrupção da corrente de falta seja garantida, as suportabilidades térmica e dielétrica do disjuntor devem ser sempre superiores à TRT, caso contrário a falta será restabelecida.

A magnitude total da TRT compreende um surto inicial, provocado pela abertura do disjuntor, que se propaga através das linhas de transmissão e se reflete em pontos de descontinuidade, acrescido destas reflexões ao chegarem ao ponto onde o surto teve início. O surto inicial por sua vez, possui uma componente de frequência industrial, definida pelas fontes conectadas à rede, e cuja magnitude é função do tipo de falta (trifásicas e bifásicas aterradas ou não, e monofásicas) e do grau de aterramento da rede (relação x_0/x_1) e possui uma ou mais componentes de frequência natural, definidas pelos parâmetros da rede (indutâncias e capacitâncias), e cujo número é função do ponto de aplicação da falta.

No processo de interrupção da falta, após a extinção do arco, enquanto os contatos do disjuntor ainda estão próximos um do outro, é necessário que o resfriamento do interior da câmara do disjuntor seja mais rápido que o crescimento da TRT enquanto que, quando os contatos do disjuntor já estão mais afastados um do outro, a suportabilidade dielétrica do meio de extinção deve ser superior aos valores instantâneos atingidos pela TRT.

Portanto, a taxa de crescimento e o pico são os parâmetros que caracterizam a severidade da TRT

2. Cálculo da TRT

Para o cálculo da TRT, os seguintes fatores devem ser convenientemente selecionados e combinados de forma a cobrir a diversa gama de possibilidade de condições de operação de um sistema real (3):

- ⇒ Tipo de falta
- ⇒ Local de aplicação de falta
- ⇒ Extensão da rede a ser representada
- ⇒ Cálculo e localização dos equivalentes da rede não representada
- ⇒ Modelagem dos elementos da rede
- ⇒ Tempo de observação do fenômeno

Devido à complexidade das redes elétricas existentes, no que se refere ao número elevado de elementos que a compõem, o cálculo da TRT deve ser realizado através de computadores

digitais, com a utilização de programas específicos para o cálculo de transitórios eletromagnéticos, onde podem ser representados os diversos elementos componentes da rede estudada.

Todavia, para uma boa compreensão dos fatores que influenciam nos resultados do fenômeno, costuma-se analisar a TRT sob os seguintes pontos de vista:

⇒ componente de frequência industrial, para se demonstrar a dependência da magnitude dessa componente com o tipo de falta (trifásica e bifásica, aterradas ou não e monofásicas) e com o grau de aterramento da rede (relação x_0/x_1).

⇒ componente (s) de frequência natural, para se demonstrar a dependência do número dessas componentes com o ponto de aplicação da falta (falta terminal, falta quilométrica, falta alimentada por transformador, etc).

⇒ ondas trafegantes, para se demonstrar a dependência da forma final dessa onda com os coeficientes de reflexão e refração, sendo que o primeiro é influenciado pelo tipo de terminação das linhas de transmissão (em vazio, por indutância e por capacitância) e o segundo, pela inclusão ou não da indutância efetiva da fonte no seu cálculo.

3. Exemplo

Seja calcular a TRT entre os contatos do disjuntor **D₁** para a abertura correspondente a uma falta no ponto **A** da subestação da Figura 1.

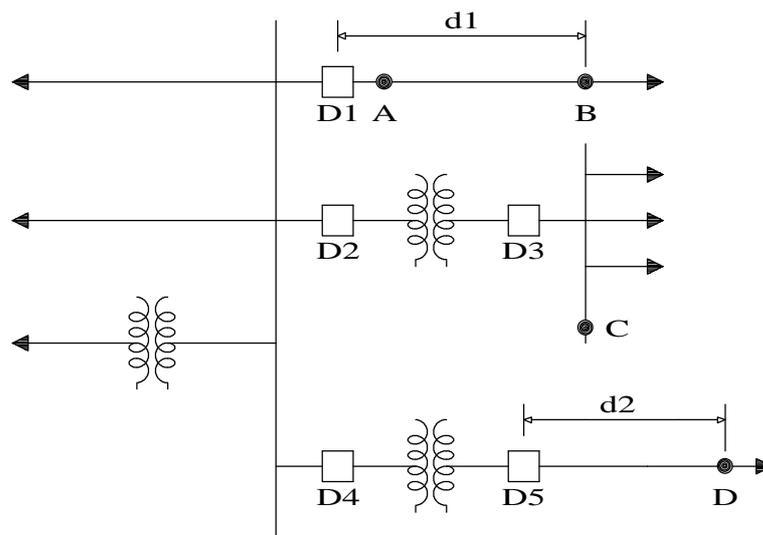


Figura 1 - Unifilar de uma Subestação para Ilustrar os Diversos Casos de TRT

O circuito monofásico equivalente é mostrado na figura 2.

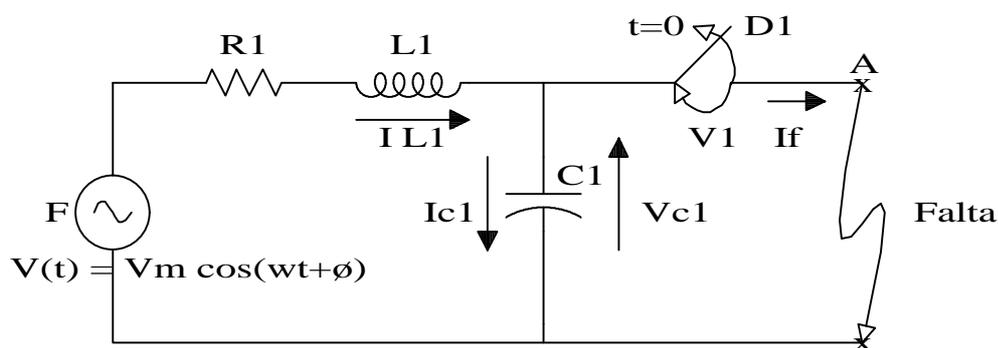


Figura 2 - Circuito Equivalente para Cálculo da TRT no Ponto A da Figura 1

Os elementos constantes do circuito indicado na Figura 2 tem o seguinte significado :

⇒ F = fonte de tensão equivalente

⇒ $v(t) = V_m \cos (wt+\phi)$

⇒ R_1 , L_1 = impedância equivalente

⇒ C_1 = capacitância das buchas dos equipamentos e dos barramentos

Este circuito é constituído de uma malha fechada R_1 , L_1 , C_1 , cuja frequência natural de oscilação é definida pelos parâmetros L_1 e C_1 .

A tensão de restabelecimento $V_r (t)$ do disjuntor D_1 será igual à tensão que se desenvolverá através dos contatos do capacitor C_1 , $V_{c1} (t)$, cuja equação é:

$$\frac{d^2V_{C1}}{dt^2} + \frac{R_1}{L_1} \frac{dV_{C1}}{dt} + \frac{1}{L_1 C_1} V_{C1} = \frac{V_m}{L_1 C_1} \cos(\omega t + f)$$

Considerando-se as condições iniciais de tensão no capacitor C_1 igual a zero e de corrente no indutor L_1 igual a corrente de falta I_F e que o valor do resistor R_1 é desprezível em presença da reatância indutiva ωL_1 , chega-se a seguinte solução:

$$V_c(t) = V_0(\cos \omega t - \cos \omega_0 t)$$

onde $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$ é a frequência natural de oscilação do circuito.

Na figura 3 está mostrado o gráfico da função $V_r(t)$, considerando-se o efeito da resistência R_1 , que irá amortecer a componente transitória $V_m \cos \omega t$ da TRT.

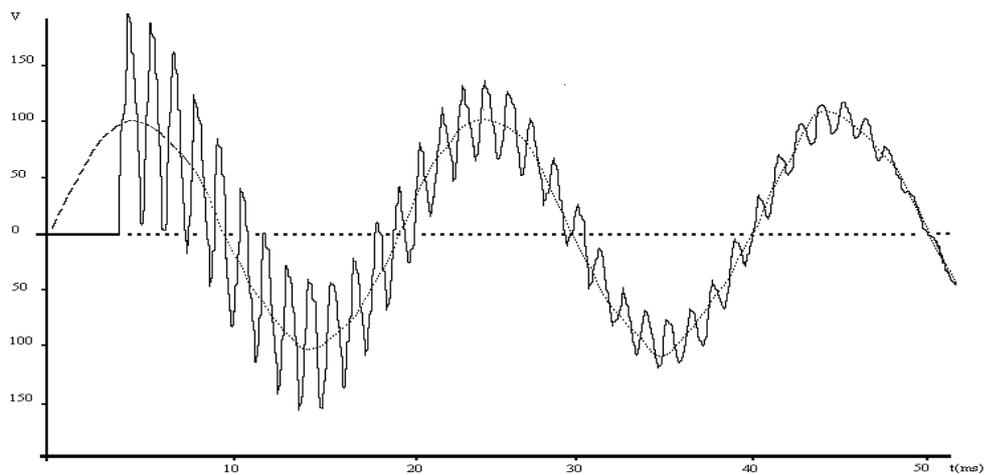


Figura 3 - Tensão de Restabelecimento Transitória

4. Modelagem no ATP

4.1 Representação da Rede

O estudo deve ser realizado com a representação trifásica da rede, de modo a ser possível a observação da abertura dos três pólos do disjuntor e também a simulação da abertura de faltas assimétricas (monofásicas ou bifásicas). A representação monofásica se aplica apenas em análises simplificadas.

4.2 Equivalentes

Por se tratar de um fenômeno transitório de duração definida (tempo de observação da ordem de 1 ms), a rede estudada pode ser "cortada" em pontos suficientemente distantes do disjuntor analisado e a porção além desses pontos, substituída por equivalentes.

Os equivalentes de mais fácil obtenção são os de curto-circuito, porém, se substituem bem a rede para a frequência industrial (60 Hz), o mesmo não se pode afirmar para as demais frequências associadas ao fenômeno. Portanto, seria mais indicada a utilização de equivalentes em frequência mas, estes por sua vez, são de mais difícil obtenção.

Todavia, a prática vem demonstrando que os equivalentes de curto-circuito acarretam resultados satisfatórios, principalmente se sua distância ao disjuntor analisado for da ordem de 300 km, além de se ter garantida a reprodução da corrente de curto-circuito no ponto de falta. Sendo os equivalentes constituídos por fontes de tensão e impedâncias, as fontes devem ser representadas pelo modelo de fonte senoidal (tipo 14 do ATP) e as impedâncias, por elementos R L mutuamente acoplados (51, 52 e 53).

4.3 Linhas de Transmissão

As linhas de transmissão devem ser representadas por um modelo que permite a simulação da propagação do surto gerado pela abertura do disjuntor através das mesmas. Portanto, o modelo indicado é o de parâmetros distribuídos do ATP (-1, -2, e -3).

4.4 Transformadores

A representação dos transformadores não apresenta nenhum requisito especial. Portanto, o modelo indicado é o "Saturable Transformer Component" (ver seção IV-E do ATP Rule Book), que é para uso geral. A prática também mostra que a utilização de outros modelos, como, por exemplo, o modelo matricial obtido através da rotina "XFORMER" conduz aos mesmos resultados.

4.5 Disjuntores

Os disjuntores devem ser representados pelo modelo de chave simples tempo-controlada do ATP. Deve ser observada a abertura dos três pólos do disjuntor, o que requer um tempo de aproximadamente 10 ms.

4.6 Capacitâncias Parasitas

Os barramentos e as buchas dos equipamentos possuem capacitâncias inerentes, que se tornam mais efetivas quanto maior for a frequência do transitório. Estas capacitâncias devem ser representadas pelo modelo de elementos concentrados.

4.7 Tempo Total do Estudo e Passo de Integração

Conforme já afirmando anteriormente, o tempo total do estudo deve ser suficiente para a observação da abertura dos três pólos do disjuntor. O valor de 10 ms atende a este requisito. Para passo de integração, deve-se usar um valor entre 1 e 10 microssegundos.

5. Aplicação Numérica com o ATP

Determinar a tensão (TRT) e a corrente em função do tempo, através dos terminais do disjuntor **D₁** da Figura 2 durante a interrupção de uma falta em seus terminais, bem como suas formas de onda.

Dados:

$$\begin{aligned}
 R &= 0,105 \text{ ohms} & L &= 1,0 \text{ mH} & C &= 38,58 \text{ microfarad} \\
 T_o &= 2. \text{ E-3 seg} & \text{DELTA}T &= 10. \text{ E-6 seg} & T_{\text{MAX}} &= 10. \text{ E-3 seg} \\
 V(t) &= 100 \cos(2 \pi 50 t - 90^\circ) \text{ Volts}
 \end{aligned}$$

O cálculo da TRT pode ser obtido através de simulação, sendo que a Figura 4 mostra o arquivo de entrada de dados para o ATP correspondente ao exemplo em questão, constituído do seguinte conjunto de instruções:

```

BEGIN NEW DATA CASE
C TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITORIA FILE = ATP\SCRATCH\EXE5.DAT
C DADOS MISCELANEOS
-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----
+-----8
  10.E-6  10.E-3
    100    1      1      1      1      1
C ELEMENTOS R L C
  FONTE  CAPA
    CAPA
-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----
+-----8
BLANK CARD ENDING BRANCH CARDS

```

```

C INTERRUPTORES
  CAPA          -1.0      .002
3
BLANK CARD ENDING SWITCH CARDS
C FONTES
14 FONTE        100.      50.      -90.          -1.0
BLANK CARD ENDING SOURCE CARDS
-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----
+-----8
      FONTE  CAPA
BLANK CARD ENDING OUTPUT CARDS
BLANK CARD ENDING PLOT CARDS
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK ENDING ALL CASES

```

Figura 4 - Arquivo de Dados no ATP para o Cálculo da TRT do Circuito da Figura 2

5.1 Instrução Opcional de Início/Separação de Casos

```

-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----
+-----8
BEGIN NEW DATA CASE
C TENSAO DE RESTABELECIMENTO TRANSITORIA FILE = ATP\SCRATCH\EXE5.DAT

```

Instrução opcional utilizada em todo início de arquivo para sinalizar o início de um novo caso (pode ser utilizada também como separação de casos em arquivos contendo vários casos). Para maiores detalhes ver item II-A do ATP Rule Book, Optional Case-Separation Card.

A segunda linha é um comentário (C na coluna 1 seguido de branco na coluna 2), utilizado para identificação do arquivo. Todas as colunas a partir da coluna 3 podem ser utilizadas para o texto referente ao comentário.

5.2 Primeiro Grupo de Informações - Miscellaneous Data Cards

5.2.1 Instrução de Dados Miscelâneos de Ponto Flutuante

```

-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----
+-----8
C DADOS MISCELANEOS DE PONTO FLUTUANTE
  10.E-6  10.E-3

```

É a primeira instrução obrigatória e contém dados miscelâneos de ponto flutuante para o processamento do caso, tais como: intervalo de integração (DELTAT), tempo total de simulação (TMAX), frequência para definição dos parâmetros referentes às indutâncias (XOPT) e às capacitâncias (COPT), tolerâncias (EPSILN e TOLMAT) e tempo para reiniciar

um caso (TSTART).

Neste caso foi especificado um DELTAT de 10 microssegundos e um TMAX de 10 milissegundos pelas razões já expostas anteriormente no item 4.7.

Os valores de XOPT e COPT foram deixados em branco, o que significa que os valores especificados para as indutâncias e para as capacitâncias serão interpretados pelo ATP como sendo em milihenries e microfarads, respectivamente.

Os demais parâmetros EPSLIN, TOLMAT e TSTART não foram especificados e, portanto, o ATP assume valores "default" para os mesmos, o que ocorre na maioria dos casos com relação a estes parâmetros (item II-B do ATP Rule Book, Floating-point Miscellaneous Data Card).

5.2.2 Instrução de Dados Miscelâneos Inteiros

```
-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----  
+-----8  
C DADOS MISCELANEOS INTEIROS  
      100      1      1      1      1      1
```

É a segunda instrução obrigatória e contém dados miscelâneos inteiros para a especificação básica de saída de dados, tais como: quantidade de pontos para impressão (IOUT), quantidade de pontos para gráficos (IPLOT), tabela de conexões (IDOUBL), fluxos nos ramos da rede (KSSOUT), valores máximos das variáveis (MAXOUT), mudança da frequência de impressão (IPUN), controle de gravação da memória do ATP em disco para uso subsequente com "START AGAIN" (MEMSAV), gravação permanente de pontos para posterior plotagem (ICAT), números de energizações em casos de chaves estatísticas ou sistemáticas (NENERG) e controle de impressão de diagnóstico (IPRSUP).

Neste caso foi especificado que a frequência de saída é de 2 em 2 pontos (IOUT = 2), que todos os pontos são disponíveis para a saída gráfica (IPLOT) = 1), que serão impressos a tabela de conexões (IDOUBL = 1), os fluxos nos ramos da rede (KSSOUT = 1) e os valores máximos das variáveis (MAXOUT = 1) e que serão gravados pontos para plotagem (ICAT = 1).

Os demais parâmetros IPUN, MEMSAV, NENERG e IPRSUP não foram especificados, pois não se aplicam ao presente caso (item II-B do ATP Rule Book, Integer Miscellaneous Data Card).

```
-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----  
+-----8  
C ELEMENTOS R L C  
  FONTE  CAPA      0.105  1.00  
  CAPA                                38.58  
BLANK CARD ENDING BRANCH CARDS
```

5.3 Ramos Lineares e Não Lineares

Os elementos que compõem a rede elétrica no presente caso se enquadram em apenas um tipo, conhecido por ramo RLC.

Foram especificados dois ramos RLC, um entre os nós FONTE e CAPA, constituído por uma resistência de 0.105 ohms e por uma indutância de 1.0 milihenries e o outro, entre os nós CAPA e TERRA, constituído por uma capacitância de 39.58 microfarads (item IV-A do ATP Rule Book, Branch Card for Uncoupled, Lumped, Series R-L-C Branch).

5.4 Chaves

```
-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----  
+-----8  
C INTERRUPTORES  
  CAPA          -1.0      .002  
3  
BLANK CARD ENDING SWITCH CARDS
```

O disjuntor do presente estudo corresponde ao modelo de chave simples tempo-controlada do ATP.

Foi especificada uma chave simples (ITYPE = 0) entre os nós CAPA e TERRA, que se encontrava fechada em regime permanente (TCLOSE = -1), e que abre a partir do instante especificado (TOPEN = 0.002). Na coluna 80 é especificado o valor 3 correspondente a solicitação de saída de corrente e tensão através da chave (item VI do ATP Rule Book, Switch Cards)

5.5 Fontes

```
-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----  
+-----8  
C FONTES  
14 FONTE      100.      50.      -90.      -1.0  
BLANK CARD ENDING SOURCE CARDS
```

A fonte de alimentação do circuito foi representada pelo modelo de fonte de tensão senoidal, tipo 14 do ATP, conectada ao nó FONTE, de amplitude igual a 100 volts, frequência de 50 Hz e ângulo de fase igual a - 90 graus.

O valor do parâmetro TSTART igual a - 1 significa que a fonte já se encontrava ligada no regime permanente e o do parâmetro TSTOP igual a 1, que a fonte permanece ligada até o fim da simulação (item VII-A do ATP Rule Book, Static Electric Network Source Functions).

5.6 Especificação para Saída

```
-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----  
+-----8  
        FONTE  CAPA  
BLANK CARD ENDING OUTPUT CARDS
```

Em complemento às opções existentes na maioria dos componentes da rede elétrica para as variáveis dos ramos (coluna 80 em cada componente), há a possibilidade de se especificar todos os tipos de variáveis nesta parte do arquivo. Geralmente estas informações são utilizadas somente para as tensões dos nós. No presente caso, foram especificadas as tensões dos nós FONTE e CAPA (item XII do ATP Rule Book, Output Variable Specification Cards).

5.7 Informações Complementares

```
-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----  
+-----8  
BLANK CARD ENDING PLOT CARDS  
BLANK  
BEGIN NEW DATA CASE  
BLANK ENDING ALL CASES
```

Os grupos de dados descritos em 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6 devem ser sempre terminados por uma linha em branco. Como no caso em questão não foram requisitados gráficos associados à saída do caso (o arquivo de saída correspondente às variáveis solicitadas será editado pelo usuário no micro), não há nenhuma instrução essencial, com exceção da informação de terminação de grupo.

Também é necessária mais uma linha em branco para terminar o caso, seguida de outra linha, com a declaração BEGIN NEW DATA CASE e de mais outra linha em branco.

Os comentários são inseridos no arquivo de dados através de um C na coluna 1 e um espaço na coluna 2 de cada linha de comentário. O ATP interpreta a palavra BLANK (a partir da coluna 1) como se a instrução estivesse em branco e o restante da linha pode também ser utilizado como comentário.

6. Listagem de saída do ATP

A listagem com a saída do caso correspondente ao arquivo mostrado na Figura 4 encontra-se nas páginas 12 e 13 a seguir.

Bibliografia

(1) - "Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento - Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão" - livro técnico publicado por FURNAS/UFF, 1987 - CAP. 5 - ESMERALDO, P. C. V., FONSECA, C. S., VAISMAN, R.

(2) - "Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento - Aplicação em Sistemas Potência de Alta Tensão" livro técnico publicado por FURNAS/UFF, 1987 - CAP. 17 - AMON F. J.

(3) - "Tensão de Restabelecimento Transitória de Disjuntores - Metodologia de Estudo" Dissertação de mestrado, PUC - RJ, Janeiro de 1986 - AMON F. J.

```

Alternative Transients Program (ATP), Salford 386 translation. Copyright 1987. Use licensed only by LEC (K.U. Leuven, Belgium).
Date (dd-mth-yy) and time of day (hh.mm.ss) = 14-Sep-94 11.39.18 Name of disk plot file, if any, is C:EXE5.pl4
For information, consult the copyrighted ATP EMTP Rule Book published by LEC in July, 1987. Last major program update: Oct, 1990
Total length of "LABCOM" tables = 2251555 INTEGER words. "VARDIM" List Sizes follow : 5002 6000 10000 1000 50000
800 14000 35000 1500 3200 1000 1000100000 400 64800 800 80 100 32000 13200 2000 3000 80000 60 8000
1680 20
-----+-----
Descriptive interpretation of input data cards. | Input data card images are shown below, all 80 columns, character
by character
0 1 2 3 4 5 6
7 8
01234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
01234567890
-----+-----
Comment card. KOMPAN = 1. |C data:EXE5.DAT
Marker card preceding new EMTP data case. |BEGIN NEW DATA CASE
Comment card. KOMPAN = 1. |C TENSAO DE RESTABELECIMENTO TRANSITORIA FILE = ATP\SCRATCH\EXE5.DAT
Comment card. KOMPAN = 1. |C DADOS MISCELANEOS
Comment card. KOMPAN = 1. |C -----1-----2-----3-----4-----5-----6-----
7-----8
Misc. data. 1.000E-05 1.000E-02 0.000E+00 | 10.E-6 10.E-3
Misc. data. 100 1 1 1 1 0 0 1 0 0 | 100 1 1 1 1 1
Comment card. KOMPAN = 1. |C ELEMENTOS R L C
Series R-L-C. 1.050E-01 1.000E-03 0.000E+00 | FONTE CAPA 0.105 1.00
Series R-L-C. 0.000E+00 0.000E+00 3.858E-05 | CAPA 38.58
Comment card. KOMPAN = 1. |C -----1-----2-----3-----4-----5-----6-----
7-----8
Blank card ending branches. IBR, NTOT = 2 3 |BLANK CARD ENDING BRANCH CARDS
Comment card. KOMPAN = 1. |C INTERRUPTORES
Switch. -1.00E+00 2.00E-03 0.00E+00 0.00E+00 | CAPA -1.0 .002
3
Blank card ending switches. KSWTCH = 1. |BLANK CARD ENDING SWITCH CARDS
Comment card. KOMPAN = 1. |C FONTES
Source. 1.00E+02 5.00E+01 -9.00E+01 -1.00E+00 |14 FONTE 100. 50. -90.
1.0
Blank card ends electric network sources. |BLANK CARD ENDING SOURCE CARDS

```

List of input elements that are connected to each node. Only the physical connections of multi-phase lines are shown (capacitive and inductive coupling are ignored). Repeated entries indicate parallel connections. Switches are included, although sources (including rotating machinery) are omitted -- except that U.M. usage produces extra, internally-defined nodes "UMXXXX".

```

-----+-----
From bus name | Names of all adjacent busses.
-----+-----
FONTE | CAPA*
CAPA | TERRA *TERRA * FONTE*
TERRA | CAPA* CAPA*
-----+-----

```

Sinusoidal steady-state phasor solution, branch by branch. All flows are away from a bus, and the real part, magnitude, or "P" is printed above the imaginary part, the angle, or "Q". The first solution frequency = 5.00000000E+01 Hertz.

```

Bus K Phasor node voltage Phasor branch current Power flow
Power loss

```

P and Q	Bus M	Rectangular	Polar	Rectangular	Polar	P and Q
4784.8615070403	FORTE	.6123031769E-14	100.	-286.3254430279	301.89438415068	4784.8615070403
14316.2721514		-100.	-90.0000000	-95.69723014081	-161.5190640	14316.272151393
	CAPA	0.0	0.0	286.32544302786	301.89438415068	0.0
		0.0	0.0	95.697230140806	18.4809360	0.0
0.0	CAPA	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	TERRA	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Total network loss P-loss by summing injections = 4.784861507040E+03

Output for steady-state phasor switch currents.

Node-K	Node-M	I-real	I-imag	I-magn	Degrees	Power
Reactive	CAPA	-2.86325443E+02	-9.56972301E+01	3.01894384E+02	-161.5191	0.00000000E+00
0.00000000E+00						

Solution at nodes with known voltage. Nodes that are shorted together by switches are shown as a group of names, with the printed result applying to the composite group. The entry "MVA" is $\sqrt{P^2 + Q^2}$ in units of power, while "P.F." is the associated power factor.

source power	Node name	Source Rectangular	node voltage Polar	Injected Rectangular	source current Polar	Injected P and Q
0.0	CAPA	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	TERRA	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15094.719207534	FORTE	.6123031769E-14	100.	-286.3254430279	301.89438415068	4784.8615070403
0.3169891		-100.	-90.0000000	-95.69723014081	-161.5190640	14316.272151393

Comment card. KOMPAN = 1. | C -----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

Card of names for time-step loop output. | FONTE CAPA

Blank card ending requests for output variables. | BLANK CARD ENDING OUTPUT CARDS

Column headings for the 4 EMTF output variables follow. These are divided among the 5 possible classes as follows

...
 First 3 output variables are electric-network voltage differences (upper voltage minus lower voltage);
 Next 1 output variables are branch currents (flowing from the upper node to the lower node);

Step	Time	CAPA	FONTE	CAPA	CAPA
		TERRA		TERRA	
***	Phasor I(0) =	-2.8632544E+02		Switch	" CAPA" to " " closed in the steady-state.
0	0.0	0.0	.6123E-14	0.0	-286.32544
100	.1E-2	0.0	30.9016994	0.0	-242.73964
200	.002	0.0	58.7785252	0.0	-175.39281
300	.003	0.0	80.9016994	0.0	-90.877329
***				Open switch	" CAPA" to " " after
3.98000000E-03	sec.				
400	.004	.738327301	95.1056516	.738327301	0.0
500	.005	58.4716762	100.	58.4716762	0.0
600	.006	151.455609	95.1056516	151.455609	0.0
700	.007	158.150175	80.9016994	158.150175	0.0
800	.008	62.4905528	58.7785252	62.4905528	0.0
900	.009	-35.699011	30.9016994	-35.699011	0.0

Final time step, PLTFIL dumps plot data to ".PL4" disk file.

Done dumping plot points to C-like disk file.

1000 .01 -49.665842 .75112E-11 -49.665842 0.0

Extrema of output variables follow. Order and column positioning are the same as for the preceding time-step loop output.

Variable maxima :	191.824949	100.	191.824949	0.0
Times of maxima :	.0046	.005	.0046	.00398
Variable minima :	-49.665842	.6123E-14	-49.665842	-286.32544
Times of minima :	.01	0.0	.01	0.0

Blank card terminating all plot cards. |BLANK CARD ENDING PLOT CARDS

Actual List Sizes for the preceding solution follow. 14-Sep-94 11.39.27

Size 1-10:	3	2	2	1	4	1	5	0	0	0
Size 11-20:	0	4	-9999	-9999	-9999	0	0	0	23	0
Size 21-29:	0	0	2	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	

Seconds for overlays 1-5 :	6.266	0.000	6.266	---	(CP: I/O: tot)
Seconds for overlays 6-11 :	1.207	0.000	1.207		
Seconds for overlays 12-15 :	0.551	0.000	0.551		
Seconds for time-step loop :	0.934	0.000	0.934		
Seconds after DELTAT-loop :	0.273	0.000	0.273		
Totals :	9.230	0.000	9.230		

Capítulo VIII

Data Modularization

1. Introdução

O ATP apresenta uma facilidade, denominada "DATA MODULARIZATION", que permite a criação de bibliotecas de modelos, expandindo e melhorando o uso do programa em várias aplicações.

Um ou mais componentes do programa podem ser agrupados num único módulo, o qual passaria a ser visto pelo ATP como se fosse um modelo.

Os módulos, uma vez criados, são inseridos no arquivo do caso a ser simulado através do comando "\$INCLUDE" . Somente alguns parâmetros são explicitados na criação dos módulos, tais como os nomes das barras de conexão e valores numéricos dos componentes, os quais são especificados pelo usuário como se fossem os argumentos de uma subrotina.

O programa de suporte que executa esta função é o "DATA BASE MODULE", onde os formatos originais do programa ATP devem ser rigorosamente obedecidos.

Para melhorar ainda mais o uso desta facilidade deve ser utilizada a função "DATA SORTING BY CLASS", que são instruções do tipo "/CARDS", por exemplo: "/SWITCH", "/BRANCH", etc..., onde a ordem original requerida pelo ATP é relaxada, com os componentes podendo aparecer na ordem que o usuário especificar.

2. Função dos "/CARDS"

As instruções do tipo "/BRANCH", "/SWITCH", "/SOURCE", etc... (seção I5 do ATP Rule Book), tem a finalidade de relaxar a obrigatoriedade do usuário fornecer os grupos de instruções nas ordens pré-determinadas pelo programa.

Com este tipo de instrução os dados podem ser inseridos em qualquer ordem na estrutura geral do arquivo de entrada do ATP, sendo, portanto, essencial a sua utilização quando a função "DATA BASE MODULE" é empregada, uma vez que esta última pode conter mais de um tipo de componente.

3. Função "\$INCLUDE"

A instrução "\$INCLUDE" é sempre utilizada em associação com a função "DATA BASE MODULE", a qual é apresentada na seção Ik do ATP Rule Book. A sua finalidade é inserir no arquivo de dados o módulo criado pela função "DATA BASE MODULE".

Devem ser especificados o nome do arquivo e os valores dos argumentos, definidos quando da criação do "DATA BASE MODULE".

4. Função "DATA BASE MODULE"

A função "DATA BASE MODULE" tem por objetivo criar um módulo, consistindo de um ou mais componentes, que pode ser utilizado, para a montagem do arquivo a ser utilizado na simulação, de forma mais amigável pelo usuário.

Com esta função pode ser criada uma biblioteca de modelos, onde apenas alguns parâmetros precisam ser especificados pelo usuário. Caso os valores numéricos sejam definitivos, somente os nomes das barras precisariam ser especificados como argumentos pelo usuário.

Uma vez criado o módulo, onde há necessidade de se obedecer aos formatos do ATP e às regras de utilização da função "DATA BASE MODULE", a sua utilização é realizada através do comando "\$INCLUDE" de forma muito simples, sem necessidade de se conhecer os formatos do ATP. Podem ser criados módulos monofásicos, trifásicos ou de qualquer outra natureza, como no caso de pontes conversoras, os quais são conectados ao arquivo principal simplesmente através do comando "\$INCLUDE".

O arquivo de entrada para a função "DATA BASE MODULE" tem a seguinte estrutura:

1. BEGIN NEW DATA CASE NOSORT
2. DATA BASE MODULE
3. \$ERASE
4. Lista com declaração dos argumentos
5. Dados dos componentes
6. BEGIN NEW DATA CASE
7. Cartões comentários
8. \$PUNCH
9. Cartão branco de terminação

Nos próximos itens serão detalhados os itens 4 e 5 da estrutura mostrada acima.

4.1. Lista com declaração dos argumentos

A declaração dos argumentos define o tipo de argumento que será utilizado na preparação do módulo. Há dois tipos básicos: o argumento que será externalizado e o argumento interno.

O argumento externo pode se referir a nomes de barras e/ou valores numéricos, sendo necessário definir que argumentos são numéricos de forma explícita.

A declaração dos argumentos referentes aos nomes e valores tem o seguinte formato:

ARG, name 1, name 2,

A ordem dos nomes dos argumentos será mantida quando de sua utilização através do comando "\$INCLUDE".

Com o objetivo de evitar problemas de incompatibilidade no tamanho do argumento há símbolos especiais, detalhados na seção XIX-F do ATP Rule Book, que podem ser utilizados para completar os seis dígitos reservados para os nomes.

A declaração dos argumentos numéricos deve ser complementada com uma declaração consecutiva própria para esta finalidade.

Os seguintes formatos são aplicáveis:

ARG, name 1, value 1, value 2, ...

NUM, value 1, value 2

Nas declarações acima deve ser observado que ao argumento "name1" será atribuído o nome de uma barra e que aos argumentos "value 1" e "value 2" serão atribuídos valores numéricos, quando o comando "\$INCLUDE" for especificado.

Da mesma forma que anteriormente já mencionado, a ordem dos argumentos é mantida conforme a declaração ARG. Na declaração NUM a ordem não é importante. O formato dos argumentos numéricos deve ser real com ponto decimal, não sendo permitido utilizar o formato E.

A declaração dos argumentos internos ao módulo é realizada da seguinte forma:

DUM, dummy 1, dummy 2

Os argumentos da declaração DUM não necessitam aparecer nas declarações ARG ou NUM. Consequentemente não podem ser atribuídos nomes ou valores a estes argumentos, cuja utilização é restrita somente aos nomes e valores internos do módulo. A sequência dos argumentos na declaração DUM é arbitrária.

4.2. Dados dos Componentes ("template")

Os dados dos componentes são especificados nos formatos tradicionais do ATP, referentes a cada um dos modelos, tal como indicados no ATP Rule Book. A diferença fundamental é que alguns valores numéricos podem ser definidos como argumentos, para serem definidos na declaração "\$INCLUDE", sendo esta a principal vantagem da utilização da função "DATA BASE MODULE".

Todos os dados devem vir precedidos de cartões do tipo "/cards" para permitir a utilização do módulo em qualquer parte do arquivo completo.

É importante observar que todos os argumentos do tipo "nomes" serão ajustados pela esquerda. No caso de um componente trifásico o argumento pode ter somente 5 dígitos, ficando o último para a definição das fases. Os argumentos do tipo "numéricos" são ajustados pela direita, ao contrário dos argumentos do tipo "nomes".

5. Exemplos de utilização

5.1. Resistência monofásica

Para a criação de um módulo, consistindo de uma resistência monofásica, com especificação das barras terminais e do valor numérico da resistência, o arquivo da função "DATA BASE MODULE" tem a seguinte estrutura:

```
-----1-----2-----3-----4-----5
BEGIN NEW DATA CASE          --- NOSORT ---
DATA BASE MODULE
$ERASE
ARG, BUS01A, BUS02A, RESIST
NUM, RESIST
/BRANCH
  BUS01ABUS02A          RESIST
BEGIN NEW DATA CASE
$PUNCH,MPPI
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK CARD
-----1-----2-----3-----4-----5
```

Deve ser observado que os argumentos BUS01A, BUS02A e RESIST correspondem aos nomes das barras e ao valor numérico da resistência, respectivamente, e que todos os formatos originais do ATP foram respeitados.

O arquivo criado pela função "DATA BASE MODULE" é definido pela instrução "\$PUNCH, MPP1", sendo MPP1 um nome qualquer, o qual deve ser conectado ao arquivo de trabalho através de instrução apropriada nos cartões de controle. Estas informações se aplicam a computadores IBM de grande porte e devem ser adequadas aos tipos de computadores sendo utilizados. A estrutura do arquivo em questão é mostrada a seguir:

```

KARD  3  3  3
KARG  1  2  3
KBEG  3  9 27
KEND  8 14 32
KTEX  1  1  0
$ERASE
/BRANCH
    BUS01ABUS02A          RESIST
$EOF  User-supplied header cards follow.          14-Sep-94  12.28.26
ARG,  BUS01A, BUS02A, RESIST
NUM,  RESIST

```

Para a criação de um módulo, consistindo de uma resistência trifásica, com especificação das barras terminais e do valor numérico da resistência, o arquivo da função "DATA BASE MODULE" tem a seguinte estrutura:

```

-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5
BEGIN NEW DATA CASE          --- NOSORT ---
DATA BASE MODULE
$ERASE
ARG,  BUS01, BUS02, RESIST
NUM,  RESIST
/BRANCH
    BUS01ABUS02A          RESIST
    BUS01BBUS02B          RESIST
    BUS01CBUS02C          RESIST
BEGIN NEW DATA CASE
$PUNCH, MPP1
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK CARD
-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5

```

Da mesma forma que no caso anterior, deve ser observado que os argumentos BUS01, BUS02 e RESIST correspondem aos nomes das barras e ao valor numérico da resistência, respectivamente, e que todos os formatos originais do ATP foram respeitados.

No caso em questão, o último dígito dos argumentos correspondentes aos nomes das barras foram utilizados para a definição das fases internamente ao módulo, sem possibilidade de serem especificados pelo usuário.

As mesmas observações quanto a criação do arquivo a ser conectado à instrução "\$INCLUDE" se aplicam ao exemplo em questão. A estrutura do arquivo criado pela função "DATA BASE MODULE" tem o seguinte aspecto:

```

KARD  3  3  3  4  4  4  5  5  5
KARG  1  2  3  1  2  3  1  2  3
KBEG  3  9 27  3  9 27  3  9 27
KEND  7 13 32  7 13 32  7 13 32
KTEX  1  1  0  1  1  0  1  1  0
$ERASE
/BRANCH
  BUS01ABUS02A          RESIST
  BUS01BBUS02B          RESIST
  BUS01CBUS02C          RESIST
$EOF  User-supplied header cards follow.          14-Sep-94  12.09.12
ARG,  BUS01,  BUS02,  RESIST
NUM,  RESIST

```

A utilização propriamente dita do módulo pode ser verificada no arquivo mostrado a seguir, que é um exemplo simples de um caso de ATP:

```

BEGIN NEW DATA CASE
C EXEMPLO DE UTILIZACAO DO $INCLUDE  FILE = ATP\SCRATCH\EXE8A.DAT
$PREFIX, \ATP\SCRATCH/
$SUFFIX, .DAT
C ---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---
C DADOS MISCELANEOS
.000050      .020
      100      1      1      1      1      1      1
C CONEXAO DO ARQUIVO COM O MODELO
$INCLUDE, MPP1, NODE1A, NODE2A, 0.5
C ELEMENTOS R L C
      NODE2A      1.50
BLANK CARD ENDING BRANCH CARDS
BLANK CARD ENDING SWITCH CARDS
C ---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---
C FONTES
14NODE1A      10.0      50.0      0.0      -1.0
BLANK CARD ENDING SOURCE CARDS
      NODE1ANODE2A
BLANK CARD ENDING OUTPUT CARDS
BLANK CARD ENDING PLOT CARDS
C ---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK CARD ENDING ALL CASES

```

O caso acima corresponde ao circuito da Figura 1. A saída do ATP está mostrada na página 8.

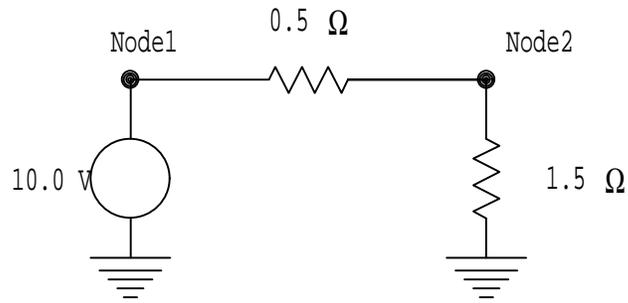


Figura 1 - Circuito utilizado para exemplificar o uso de \$INCLUDE

Bibliografia

1. K. U. Leuven EMTP Center, ATP Rule Book
2. J. A. Martinez, "EMTP Modularization: Advantages and Limitations", 18th European Users Group Meeting, Marseille, May 1990.
3. J. A. Martinez, "Adapting the EMTP for Classroom Instruction", 19th European Users Group Meeting, Marseille, May 1990.

Alternative Transients Program (ATP), Salford 386 translation. Copyright 1987. Use licensed only by LEC (K.U. Leuven, Belgium).
 Date (dd-mth-yy) and time of day (hh.mm.ss) = 14-Sep-94 12.35.07 Name of disk plot file, if any, is C:EXE8A.pl4
 For information, consult the copyrighted ATP EMTF Rule Book published by LEC in July, 1987. Last major program update: Oct, 1990
 Total length of "LABCOM" tables = 2251555 INTEGER words. "VARDIM" List Sizes follow : 5002 6000 10000 1000 50000
 800 14000 35000 1500 3200 1000 1000100000 400 64800 800 80 100 32000 13200 2000 3000 80000 60 8000 1680 20

Descriptive interpretation of input data cards. | Input data card images are shown below, all 80 columns, character by character
 0 1 2 3 4 5 6 7 8
 01234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

```

Comment card. KOMPAN = 1. | C data:EXE8A.DAT
Marker card preceding new EMTF data case. | BEGIN NEW DATA CASE
Comment card. KOMPAN = 1. | C EXEMPLO DE UTILIZACAO DO $INCLUDE FILE = ATP\SCRATCH\EXE8A.DAT
Comment card. KOMPAN = 1. | C $PREFIX,\ATP\SCRATCH/
Comment card. KOMPAN = 1. | C $SUFFIX, .DAT
Comment card. KOMPAN = 1. | C -----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
Comment card. KOMPAN = 1. | C DADOS MISCELANEOS
Misc. data. 5.000E-05 2.000E-02 0.000E+00 | .000050 .020
Misc. data. 100 1 1 1 1 0 0 1 0 0 | 100 1 1 1 1 1 1
Comment card. KOMPAN = 1. | C CONEXAO DO ARQUIVO COM O MODELO
Comment card. KOMPAN = 1. | C $INCLUDE, MPP8, NODE1A, NODE2A, 0.5
Erase all of 0 cards in the punch buffer. | $ERASE
Series R-L-C. 5.000E-01 0.000E+00 0.000E+00 | NODE1ANODE2A 0.5
Comment card. KOMPAN = 1. | C -----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
Comment card. KOMPAN = 1. | C ELEMENTOS R L C
Series R-L-C. 1.500E+00 0.000E+00 0.000E+00 | NODE2A 1.50
Blank card ending branches. IBR, NTOT = 2 3 | BLANK CARD ENDING BRANCH CARDS
Blank card ending switches. KSWTCH = 0. | BLANK CARD ENDING SWITCH CARDS
Comment card. KOMPAN = 1. | C -----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
Comment card. KOMPAN = 1. | C FONTES
Source. 1.00E+01 5.00E+01 0.00E+00 -1.00E+00 | 14NODE1A 10.0 50.0 0.0 -1.0
Blank card ends electric network sources. | BLANK CARD ENDING SOURCE CARDS
  
```

List of input elements that are connected to each node. Only the physical connections of multi-phase lines are shown (capacitive and inductive coupling are ignored). Repeated entries indicate parallel connections. Switches are included, although sources (including rotating machinery) are omitted -- except that U.M. usage produces extra, internally-defined nodes "UMXXXX".

```

From bus name | Names of all adjacent busses.
-----
NODE1A | NODE2A*
NODE2A | TERRA *NODE1A*
TERRA | NODE2A*
  
```

Sinusoidal steady-state phasor solution, branch by branch. All flows are away from a bus, and the real part, magnitude, or "P" is printed above the imaginary part, the angle, or "Q". The first solution frequency = 5.00000000E+01 Hertz.

Bus K	Bus M	Phasor node voltage		Phasor branch current		Power flow		Power loss	
		Rectangular	Polar	Rectangular	Polar	P and Q	P and Q	P and Q	
NODE1A		10.	10.	5.0	5.0	25.		6.25	
		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		0.0	
NODE2A		7.5	7.5	-5.	5.0	-18.75			
		0.0	0.0	0.0	180.0000000	0.0			
NODE2A		7.5	7.5	5.0	5.0	18.75		18.75	
		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		0.0	
TERRA		0.0	0.0	-5.	5.0	0.0			
		0.0	0.0	0.0	180.0000000	0.0			

Total network loss P-loss by summing injections = 2.500000000000E+01

Solution at nodes with known voltage. Nodes that are shorted together by switches are shown as a group of names, with the printed result applying to the composite group. The entry "MVA" is $\sqrt{P^2 + Q^2}$ in units of power, while "P.F." is the associated power factor.

```

Step      Time      NODE1A      NODE2A
0         0.0         10.         7.5
100       .005       .72736E-14 .54552E-14
200       .01        -10.        -7.5
300       .015       -.1972E-12 -.1479E-12
% % % % % Final time step, PLTFIL dumps plot data to ".PL4" disk file.
Done dumping plot points to C-like disk file.
400       .02        10.         7.5
Extrema of output variables follow. Order and column positioning are the same as for the preceding time-step loop output.
Variable maxima :      10.         7.5
Times of maxima :      0.0         0.0
Variable minima :     -10.        -7.5
Times of minima :      .01         .01
  
```

Node	Source name	Source node voltage		Injected source current		Injected source power		MVA and P.F.
		Rectangular	Polar	Rectangular	Polar	P and Q	P and Q	
NODE1A		10.	10.	5.0	5.0	25.		25.
		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		1.0000000

Card of names for time-step loop output. | NODE1ANODE2A
 Blank card ending requests for output variables. | BLANK CARD ENDING OUTPUT CARDS

Column headings for the 2 EMTF output variables follow. These are divided among the 5 possible classes as follows ...
 First 2 output variables are electric-network voltage differences (upper voltage minus lower voltage);

```

Blank card terminating all plot cards. | BLANK CARD ENDING PLOT CARDS
Seconds for overlays 1-5 :      7.309      0.000      7.309 --- (CP: I/O: tot)
Seconds for overlays 6-11 :      0.988      0.000      0.988
Seconds for overlays 12-15 :      0.438      0.000      0.438
Seconds for time-step loop :      0.605      0.000      0.605
Seconds after DELTAT-loop :      0.273      0.000      0.273
-----
Totals :      9.613      0.000      9.613
  
```

Capítulo IX

Energização de Transformadores

1. Introdução

A energização de um transformador de potência geralmente provoca sobretensões com forte conteúdo de harmônicos e baixo amortecimento, devido às características de saturação do seu núcleo de ferro.

A Figura 1 mostra uma característica $\psi \times I$ típica para um transformador de potência.

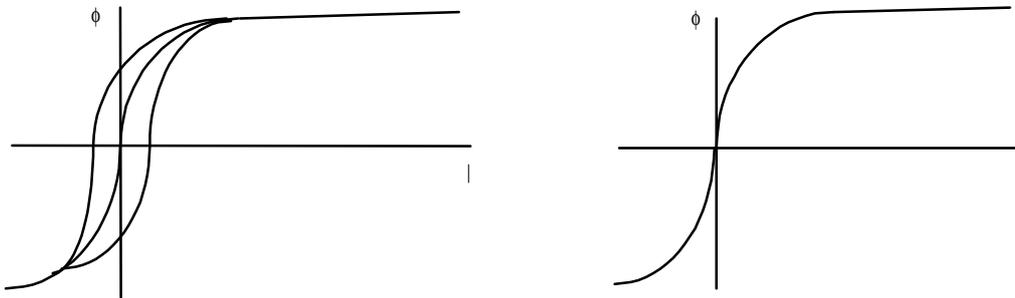


Figura 1 - Curva de Magnetização de um Transformador de Potência

Em regime permanente, a corrente de magnetização de um transformador em vazio é normalmente na faixa de 0,5 a 2 % de sua corrente nominal. As perdas por histerese costumam ser muito pequenas e a região saturada da característica de magnetização geralmente se inicia em torno de 1,2 pu de tensão.

Quando um transformador é desligado do sistema elétrico há um fluxo residual que permanece no núcleo magnético, o qual depende da característica de magnetização e das oscilações entre as capacitâncias e as indutâncias do transformador.

No instante que o transformador é novamente energizado, dependendo das características da rede elétrica, é possível que sobretensões transitórias significativas provoquem forte saturação

do núcleo magnético do transformador, a qual pode ser agravada pelo fluxo residual existente. Neste caso a corrente de "inrush" é significativa e a tensão resultante bastante distorcida, com alto teor de harmônicos.

A tensão resultante depende de uma série de fatores, tais como: instantes de fechamento dos contatos do disjuntor, fluxo residual, tensão antes do fechamento do disjuntor, potência do transformador e configuração da rede elétrica.

Geralmente o estudo é realizado somente para determinadas configurações, as quais são selecionadas por intermédio do levantamento da impedância harmônica do sistema.

A validade deste procedimento é baseada no fato de que o transformador se comporta como se fosse uma fonte de corrente durante o transitório. A injeção desta fonte de corrente contendo harmônicas na barra do sistema elétrico provocaria as tensões harmônicas, uma vez que o sistema também poderia ser substituído por suas impedâncias harmônicas. Considerando que as harmônicas devido a saturação de transformadores são de baixa ordem, seria previsível esperar que as configurações com impedâncias de magnitude elevada nas harmônicas de baixa ordem apresentassem as piores sobretensões.

Na prática o problema não é tão simples assim porque a indutância correspondente à característica de saturação é variável conforme o nível do fluxo magnético, o qual varia com o tempo, fazendo com que a característica da impedância harmônica também seja modificada com o tempo. Entretanto, a análise das configurações sob o ponto de vista das impedâncias harmônicas tem apresentado resultados consistentes, validando o procedimento em questão, cujo objetivo principal é reduzir acentuadamente a quantidade de casos do estudo.

A Figura 2 apresenta a impedância harmônica vista da barra de um sistema de 230 kV.

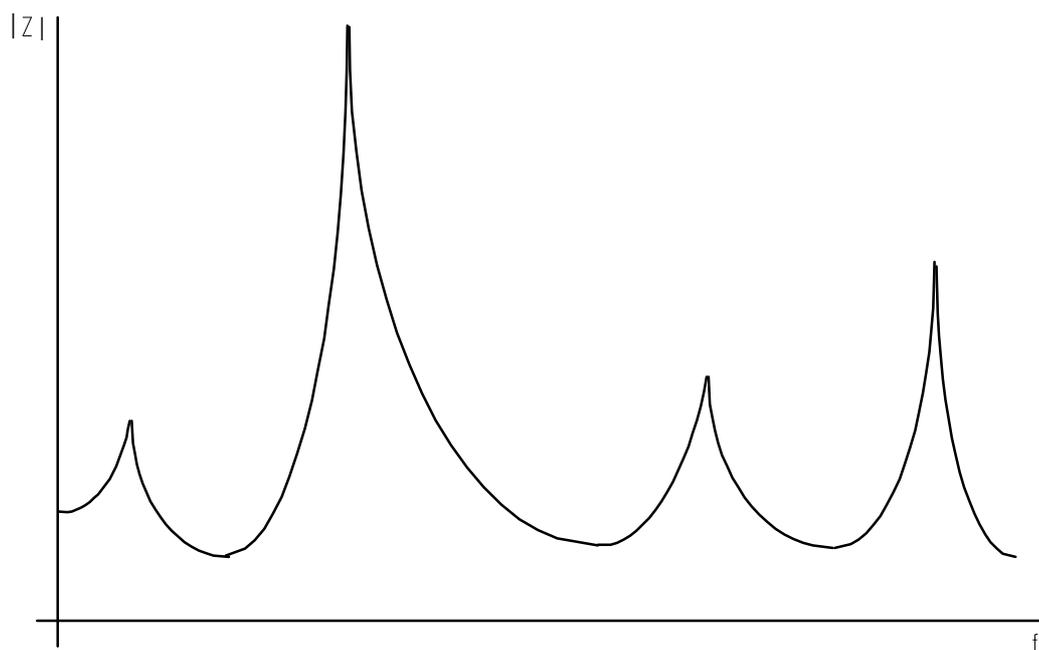


Figura 2 - Impedância harmônica vista de uma barra de um sistema de 230 kV.

2. Caracterização das Sobretensões Provocadas pela Energização de Transformadores

As sobretensões provocadas pela energização de um transformador tem uma característica marcante, uma vez que são fortemente influenciadas pela característica do núcleo magnético.

Geralmente a saturação do transformador atua como se fosse um limitador de sobretensões, reduzindo a magnitude e distorcendo a forma de onda, devido à forte injeção de harmônicos na rede. Entretanto, caso a impedância harmônica seja muito elevada é possível que as magnitudes das sobretensões sejam elevadas. No geral o amortecimento é baixo porque a corrente de "inrush" permanece por muito tempo (as perdas no ferro costumam ser muito pequenas).

A Figura 3 mostra um exemplo de uma sobretensão provocada por energização de transformador.

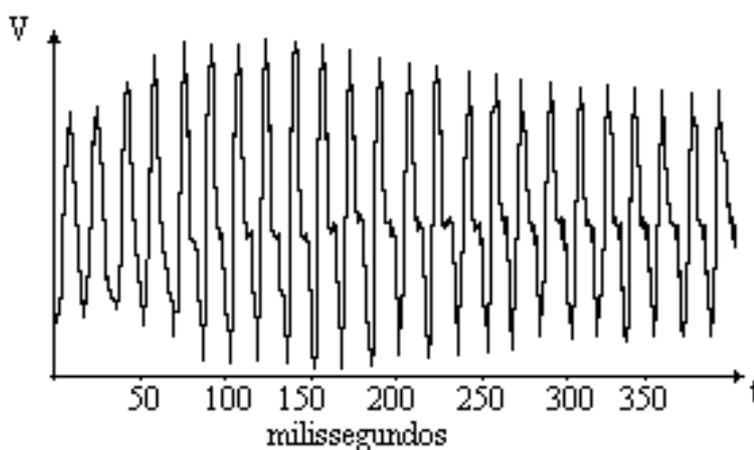


Figura 3 - Exemplo de uma Sobretensão Provocada por Energização de Transformador

Este tipo de sobretensão pode ser provocado por outras manobras na rede elétrica, tais como rejeição de carga e eliminação de defeitos.

As sobretensões acima descritas tem a sua importância acentuada na medida em que a potência do transformador aumenta e grandes bancos de capacitores são utilizados no sistema. Os bancos de capacitores tem o efeito de reduzir a ordem dos picos de ressonância da impedância harmônica do sistema.

Devido às suas características bem peculiares (forte conteúdo de harmônicos e baixo amortecimento), geralmente as sobretensões nas subestações vizinhas também apresentam formas de onda similares, porém com magnitudes inferiores às magnitudes da barra onde o transformador é energizado.

A importância das sobretensões em questão está relacionada com as solicitações transitórias nos equipamentos principais das subestações, com as energias absorvidas pelos pára-raios de ZnO e com a possibilidade de sensibilização das proteções de neutro e diferencial de barramento.

3. Modelagem do Sistema Elétrico e de seus Componentes

As sobretensões provocadas por energização de transformadores, eliminação de faltas nas proximidades de transformadores e rejeição de carga são caracterizadas como sendo sobretensões de manobra. Desta forma a modelagem dos componentes da rede elétrica deve ser voltada para a faixa de frequências característica das sobretensões de manobra (centenas de Hz a poucos KHz).

Devido ao baixo amortecimento e ao forte conteúdo de harmônicos (principalmente de baixa ordem), cuidados especiais devem ser tomados com relação ao sistema elétrico incluído na simulação.

A prática neste aspecto tem sido a comparação entre o sistema elétrico completo e o sistema elétrico modelado para o estudo, tomando-se como referência a resposta harmônica dos dois sistemas da barra onde a manobra será realizada. O sistema elétrico modelado é considerado satisfatório quando a resposta harmônica é próxima à do sistema completo para uma faixa de frequência até o 10º harmônico, por exemplo.

Para a obtenção da resposta harmônica no sistema real completo geralmente se utilizam programas digitais desenvolvidos especificamente para tal finalidade, uma vez que há particularidades na modelagem dos componentes e necessidade de representação dos ramais de alimentação das cargas (a nível de sub-transmissão e/ou distribuição). De uma forma geral há necessidade de modelos que contemplem a variação dos parâmetros com a frequência.

A rede simplificada, a qual costuma ser significativamente menor do que o sistema completo, para facilitar a simulação em regime transitório, pode também ser submetida ao mesmo tipo de programa com o objetivo de se obter a resposta harmônica. Entretanto, tendo em vista que as simulações de transitórios são normalmente efetuadas com o ATP (ou mesmo com um TNA), é prática que o levantamento da característica harmônica da rede seja efetuada com o ATP.

Na ausência de um programa específico para a obtenção da resposta harmônica do sistema completo pode-se utilizar somente o ATP, comparando-se o sistema reduzido com o sistema completo, a nível de transmissão somente. Desta forma pode-se verificar a influência dos componentes desprezados e a validade da redução efetuada.

Os transformadores devem ser modelados com a sua característica de saturação, a qual tem influência preponderante nas sobretensões resultantes. Geralmente é suficiente que o modelo considere as impedâncias de dispersão dos enrolamentos e as suas conexões, além da curva de saturação.

Para uma manobra de energização de transformador, geralmente não há cargas ou outros elementos conectados no secundário do transformador. Neste caso o circuito ativo (aquele que participa efetivamente da rede elétrica) corresponde somente ao enrolamento primário e a característica de saturação.

O levantamento da característica de saturação é realizado em determinadas condições, as quais precisam ser respeitadas na modelagem para que o transformador seja representado de forma correta. É necessário saber de que terminal foi realizado o levantamento, bem como se o terciário em delta estava aberto ou fechado e as unidades da medição (valores de pico ou RMS).

O fluxo residual tem importância relevante nas sobretensões resultantes e também deve ser levado em consideração. Nos casos de rejeição de carga e de eliminação de defeitos o fluxo existente no transformador no instante da manobra já é computado pelo ATP, uma vez que o circuito já se encontrava energizado, ao contrário da manobra de energização de transformadores (onde pode haver fluxo remanente no núcleo).

As linhas de transmissão devem ser representadas por modelos que considerem parâmetros distribuídos, variando com a frequência ou não. Considerando que as frequências envolvidas não são muito altas (centenas de Hz), a modelagem dos parâmetros variando com a frequência não seria essencial.

Os pára-raios devem ser representados por elementos não-lineares, não havendo preferência por qualquer das opções disponíveis no ATP. A característica tensão/corrente deve ser apropriada para surtos de manobra (característica levantada para correntes do tipo 45/90, 30/60 ou 1 ms), a qual pode ser obtida através de informações dos fabricantes.

Para maximizar a energia absorvida nos pára-raios, alguns cuidados especiais devem ser tomados quando se trata de pára-raios de ZnO. Um dos pára-raios deve ser modelado com a característica mínima e os demais com a característica máxima. Devido a grande não-linearidade dos pára-raios de ZnO aquele que estiver com a característica mínima terá que absorver a maior quantidade de energia.

Os disjuntores devem ser modelados por chaves estatísticas (para incluir a aleatoriedade dos instantes de fechamento dos contatos) e eventuais resistores de pré-inserção no fechamento incluídos. No caso de eliminação de defeitos os mesmos devem ser aplicados por chaves sistemáticas para permitir uma varredura na onda de tensão (o instante de ocorrência do curto deve variar em relação ao ângulo de fase da tensão).

Os demais componentes não apresentam nenhuma característica relevante.

4. Exemplo de Simulações de um Caso de Energização de Transformador

A Figura 5 apresenta o arquivo do ATP para a modelagem de um sistema de 220 kV, constituído de gerador, transformador elevador, linha de transmissão e transformador a ser energizado (Figura 4).



Figura 4 - Sistema de Transmissão de 220 kV para Modelagem no ATP

```

-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----
+---
BEGIN NEW DATA CASE
  50.E-6      0.1      60.0      60.0
    100      1      1      1      1      1
51GEMA-AMANT-A      0.0061      0.2440
52GEMA-BMANT-B      0.0058      0.2329
53GEMA-CMANT-C
  TRANSFORMER      2.683498.13TMAN-A
    2.683      498.13
    18.976      547.95
    52.688      572.85
    136.818      597.76
    9999
1SECA-A      0.872928.566132.79
2MANT-AMANT-B      0.00940.3085 13.8
  TRANSFORMER TMAN-A      TMAN-B
1SECA-B
2MANT-BMANT-C
  TRANSFORMER TMAN-A      TMAN-C
1SECA-C
2MANT-CMANT-A
  TRANSFORMER      1.073 498.13TSEI-A
    1.073      498.13
    7.590      547.95
    21.075      572.85
    54.727      597.76
    9999
1AUX-A      2.226 93.95 127.01
2SEI6-A      .1217 -.271 34.64
3SEI1-ASEI1-B      .3461 .5836 10.00
  TRANSFORMER TSEI-A      TSEI-B
1AUX-B
  
```

```

2SEI6-B
3SEI1-BSEI1-C
  TRANSFORMER TSEI-A          TSEI-C
1AUX-C
2SEI6-C
3SEI1-CSEI1-A
  SEI1-A          1.131
  SEI1-B          1.131
  SEI1-C          1.131
-1SECA-ASEIN-A      0.32341.68152.3435 248.4
-2SECA-BSEIN-B      0.05880.52063.3479 248.4
-3SECA-CSEIN-C
BLANK CARD ENDING BRANCH CARDS
  SEIN-AAUX-A      0.001      1.00
  SEIN-BAUX-B      0.005      1.00
  SEIN-CAUX-C      0.002      1.00
BLANK CARD ENDING SWITCH CARDS
14GEMA-A      10038.4      60.      0.0      -1.
14GEMA-B      10038.4      60.     -120.0     -1.
14GEMA-C      10038.4      60.     120.0     -1.
BLANK CARD ENDING SOURCE CARDS
  AUX-A AUX-B AUX-C
BLANK CARD ENDING OUTPUT CARDS
BLANK CARD ENDING PLOT CARDS
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----
+--

```

Figura 5 - Arquivo do ATP para Energização de Transformador

As seguintes informações estão contidas no arquivo mostrado na Figura 5:

```

-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----
+
BEGIN NEW DATA CASE

```

4.1 Primeira Instrução

Instrução opcional utilizada em todo início de arquivo do ATP para sinalizar o início de um novo caso (item II-A do ATP Rule Book).

4.2 Primeiro Grupo de Informações - Miscellaneous Data Cards

4.2.1 Floating-point miscellaneous data card

```

-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----
+
  50.E-6      0.1      60.0      60.0

```

Primeira instrução obrigatória com dados para o procedimento do caso, tais como: intervalo de integração, tempo total de simulação, frequências para definição dos parâmetros referentes às indutâncias e capacitâncias, tolerâncias e tempo para reiniciar um caso (item II-B do Rule

Book).

Neste caso foram especificados o intervalo de integração (50.0 ms), o tempo total de estudo (100 ms) e os valores de XOPT (60.0) e COPT (60.0), indicando que as reatâncias serão fornecidas em ohms e micromhos, respectivamente para indutâncias e capacitâncias.

4.2.2 Integer miscellaneous data card

```
-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----  
+  
      100      1      1      1      1      1      1
```

Segunda instrução obrigatória com dados para a especificação básica da saída de dados, tais como: quantidade de pontos para gráficos, tabela de conexões, fluxos nos ramos da rede, valores máximos das variáveis, quantidade de casos estatísticos, etc... (item II-B do Rule Book).

Neste caso foi especificado que a frequência de saída é de 100 em 100 pontos, que todos os pontos serão utilizados para a saída gráfica e que a tabela de conexões, o fluxo nos componentes e os valores máximos serão impressos.

4.3 Segundo Grupo de Informações - Linear and Non-linear Branch Cards

Nas instruções que definem os componentes da rede elétrica foram utilizados 4 tipos básicos diferentes:

```
-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----  
+  
51GEMA-AMANT-A          0.0061      0.2440  
52GEMA-BMANT-B          0.0058      0.2329  
53GEMA-CMANT-C
```

4.3.1 Elemento R L Acoplado (tipo 51, 52, 53)

Este tipo de componente foi utilizado para a representação da impedância do gerador. As três primeiras linhas de instrução com os códigos 51, 52 e 53 contém os valores de Ro e Lo na primeira linha e de R1 e L1 na segunda linha. A terceira linha contém somente os nomes das barras, identificando a forma de entrada dos dados (a opção seria entrar em componentes de fase, utilizando inclusive a terceira linha integralmente). Este componente está descrito na seção IV-B do ATP Rule Book.

4.3.2 Transformadores

Foram representados dois transformadores, sendo o primeiro um transformador elevador com conexões delta-estrela aterrada e relação de transformação 13,8 - 230, como mostrado a

seguir :

```

-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----
+
TRANSFORMER                2.683498.13TMAN-A
      2.683                498.13
      18.976               547.95
      52.688               572.85
      136.818              597.76
      9999

```

```

-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----
+
1SECA-A                    0.872928.566132.79
2MANT-AMANT-B              0.00940.3085 13.8
  TRANSFORMER TMAN-A                      TMAN-B
1SECA-B
2MANT-BMANT-C
  TRANSFORMER TMAN-A                      TMAN-C
1SECA-C
2MANT-CMANT-A

```

```

-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----
+

```

e o segundo um transformador de três enrolamentos, com conexões estrela-aterrada - estrela aterrada - delta e relação de transformação 220-60-10, como mostrado abaixo :

```

-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----+
TRANSFORMER                1.073 498.13TSEI-A
      1.073                498.13
      7.590                547.95
      21.075               572.85
      54.727               597.76
      9999

```

```

-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----+
1AUX-A                    2.226 93.95 127.01
2SEI6-A                   .1217 -.271 34.64
3SEI1-ASEI1-B            .3461 .5836 10.00
  TRANSFORMER TSEI-A                      TSEI-B
1AUX-B
2SEI6-B
3SEI1-BSEI1-C
  TRANSFORMER TSEI-A                      TSEI-C
1AUX-C
2SEI6-C
3SEI1-CSEI1-A
-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----+

```

Os transformadores foram representados através da utilização do modelo "saturable transformer component" (ver seção IV-E do ATP Rule Book), os quais permitem a inclusão das impedâncias de cada um dos enrolamentos, da relação de transformação e da curva de saturação.

A modelagem de um transformador trifásico é realizada através da utilização de três transformadores monofásicos, onde os nomes das barras de cada um dos enrolamentos tem a finalidade de definir o tipo de conexão.

Através da utilização da opção de referência a outro componente anterior do arquivo, a entrada de dados é simplificada, sendo necessário fornecer apenas os dados completos para um transformador monofásico e as barras e as referências das outras duas fases.

As instruções para modelagem de um transformador começam com a palavra-chave "TRANSFORMER" (colunas 3 a 13, seguidas de um par de valores para corrente e fluxo, referente ao valor da indutância de magnetização a ser utilizado no cálculo da solução em regime permanente, e de um nome para a barra interna do enrolamento, onde será conectada a característica de saturação.

Após esta primeira linha de informação devem vir os pares de pontos "corrente e fluxo", terminados por um cartão 9999 (colunas 13 e 16). O nº de pontos da característica é arbitrário. A característica de saturação pode ser suprimida caso o cartão 9999 seja o único existente neste conjunto. Uma indutância linear pode ser fornecida por intermédio de um único par de valores "corrente e fluxo".

As informações sobre os enrolamentos da 1ª fase vem a seguir, sendo arbitrária a definição da ordem dos enrolamentos. Entretanto, uma vez indicados os nomes das barras, a correlação é estabelecida porque a ordem dos enrolamentos é sempre 1, 2, 3... .

Para cada enrolamento devem ser indicados os valores de resistência (colunas 27 a 32), indutância (colunas 33 a 38) e fator da relação de transformação correspondente (colunas 39 a 44). O nº associado ao enrolamento é indicado na coluna 2.

Para as outras duas fases é necessário apenas especificar o código e os nomes das barras externas, interna e de referência. Os dados de cada enrolamento, inclusive aqueles referentes à característica de saturação são automaticamente copiados através do nome de referência.

4.3.3 Elementos R, L, C Concentrados

Este tipo de componente foi utilizado para representar as capacitâncias utilizadas para referenciar os terminais do enrolamento em delta à terra, uma vez que não é aconselhável deixar o delta flutuante.

```
-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----+
SEI1-A                                     1 . 131
SEI1-B                                     1 . 131
SEI1-C                                     1 . 131
```

Os valores utilizados são muito pequenos e não afetam a solução da rede. Foram utilizadas capacitâncias nas três fases para manter a simetria da rede. Na prática apenas um dos terminais poderia ter sido utilizado para se obter uma referência de terra.

Este tipo de componente requer apenas a especificação dos nomes das barras onde está conectado e os valores de resistência (colunas 27 a 32), indutância (colunas 33 a 38) e

capacitância (colunas 39 a 44).

Ver seção IV.A do ATP Rule Book para maiores detalhes.

4.3.4 Linhas de Transmissão com Parâmetros Distribuídos

Este tipo de componente (seção IV-D do ATP Rule Book) é utilizado para representar linhas de transmissão.

A modelagem é realizada por intermédio de parâmetros distribuídos a frequência constante, sendo informados os valores de resistência (colunas 27 a 32), indutância (colunas 33 a 38) e capacitância (colunas 39 a 44) e o comprimento da linha (colunas 45 a 50), tanto para seqüência zero quanto para seqüência positiva.

```
-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----+
-1SECA-ASEIN-A           0.32341.68152.3435 248.4
-2SECA-BSEIN-B           0.05880.52063.3479 248.4
-3SECA-CSEIN-C
```

Os primeiros campos de cada instrução são preenchidos com o código do modelo (-1, -2, -3, nas colunas 1 e 2) e os nomes das barras das duas extremidades da linha de transmissão.

No caso em questão, linha trifásica, o primeiro cartão deve conter os parâmetros de seqüência zero, o segundo os parâmetros de seqüência positiva e o terceiro cartão deve ter os campos destinados às características da linha de transmissão em branco.

O ATP Rule Book (seção IV-D) contém mais informações sobre as alternativas existentes para a modelagem de linhas de transmissão.

4.4 Terceiro Grupo de Informações - Switch Cards

Foram utilizadas três chaves determinísticas, também denominadas de ordinárias, convencionais ou de tempo controlado, para a representação das três fases do disjuntor que executa a manobra da energização do transformador. Não foram representados resistores de pré-inserção.

```
-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----+
SEIN-AAUX-A           0.001      1.00
SEIN-BAUX-B           0.005      1.00
SEIN-CAUX-C           0.002      1.00
```

Em cada linha de instrução, correspondente a cada uma das fases, devem ser especificados os nomes das barras e os tempos de fechamento e de abertura (colunas 15 a 24 e 25 a 34, respectivamente), em segundos.

Ver seção VI do ATP Rule Book para mais detalhes sobre a modelagem de chaves.

4.5 Quarto Grupo de Informações - Source Cards

Foram utilizados três fontes monofásicas, do tipo 14 (senoidal, seção VII do ATP Rule Book).

```
-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----+
14GEMA-A      10038.4      60.      0.0      -1.
14GEMA-B      10038.4      60.     -120.0     -1.
14GEMA-C      10038.4      60.     120.0     -1.
```

Na prática a função é escrita em coseno e por este motivo, com ângulo de fase zero e tempo igual a zero, a amplitude é máxima.

Devem ser especificados o tipo (colunas 1 e 2, o nome da barra (colunas 3 e 8), o código da fonte (corrente ou tensão, colunas 9 e 10), a amplitude (colunas 11 a 20), a frequência (colunas 21 a 30), o ângulo de fase (colunas 31 a 40), o parâmetro que define as unidades do ângulo de fase (colunas 41 a 50) e os tempos de início e fim (colunas 61 a 70 e 71 a 80, respectivamente). Para que a fonte se encontre ativa na solução em regime permanente, deve ser especificado um valor negativo para o campo do tempo de início.

```
-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----+
AUX-A AUX-B AUX-C
```

Outros tipos de fontes podem ser modelados, conforme a seção VII do Rule Book.

4.6 Quinto Grupo de Informações - Output Specification Cards

As tensões nas barras, bem como outras variáveis de ramos, podem ser especificadas, sendo utilizados os campos 3 a 8, 9 a 14, 15 a 20, etc... .

A seção XII do ATP Rule Book apresenta todas as opções para saída de variáveis.

4.7 Sexto Grupo de Informações - Batch-mode Plotting

Não foram especificados gráficos por esta modalidade.

4.8 Informações Complementares

Com exceção do conjunto de informações para o item 4.1 acima, todos os demais grupos de instrução são terminados por uma instrução em branco.

Uma linha em branco também é necessária para terminar o caso, seguida de um outro BEGIN NEW DATA CASE e de outra linha em branco.


```

Winding 1. 2.2260E+00 9.3950E+01 1.2701E+02 | 1AUX-A 2.226 93.95 127.01
Winding 2. 1.2170E-01 -2.7100E-01 3.4640E+01 | 2SEI6-A .1217 -.271 34.64
Winding 3. 3.4610E-01 5.8360E-01 1.0000E+01 | 3SEI1-ASEI1-B .3461 .5836 10.00
Comment card. KOMPAN = 1. | C -----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----
8
Transformer copy using reference name "TSEI-A" | TRANSFORMER TSEI-A TSEI-B
Winding 1. (No values read, since copy) | 1AUX-B
Winding 2. (No values read, since copy) | 2SEI6-B
Winding 3. (No values read, since copy) | 3SEI1-BSEI1-C
Transformer copy using reference name "TSEI-A" | TRANSFORMER TSEI-A TSEI-C
Winding 1. (No values read, since copy) | 1AUX-C
Winding 2. (No values read, since copy) | 2SEI6-C
Winding 3. (No values read, since copy) | 3SEI1-CSEI1-A
Comment card. KOMPAN = 1. | C -----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----
8
Comment card. KOMPAN = 1. | C ELEMENTOS R L C
Series R-L-C. 0.000E+00 0.000E+00 3.000E-09 | SEI1-A 1.131
Series R-L-C. 0.000E+00 0.000E+00 3.000E-09 | SEI1-B 1.131
Series R-L-C. 0.000E+00 0.000E+00 3.000E-09 | SEI1-C 1.131
Comment card. KOMPAN = 1. | C LINHA DE TRANSMISSAO
3.234E-01 1.681E+00 2.344E+00 8.471E+02 1.308E-03 | -1SECA-ASEIN-A 0.32341.68152.3435 248.4
5.880E-02 5.206E-01 3.348E+00 3.943E+02 8.699E-04 | -2SECA-BSEIN-B 0.05880.52063.3479 248.4
3rd or later transposed distributed phase. | -3SECA-CSEIN-C
Comment card. KOMPAN = 1. | C -----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----
8
Blank card ending branches. IBR, NTOT = 33 28 | BLANK CARD ENDING BRANCH CARDS
Comment card. KOMPAN = 1. | C INTERRUPTORES
Switch. 1.00E-03 1.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 | SEIN-AAUX-A 0.001 1.00
Switch. 5.00E-03 1.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 | SEIN-BAUX-B 0.005 1.00
Switch. 2.00E-03 1.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 | SEIN-CAUX-C 0.002 1.00
Blank card ending switches. KSWTCH = 3. | BLANK CARD ENDING SWITCH CARDS
Comment card. KOMPAN = 1. | C FONTES
Comment card. KOMPAN = 1. | C -----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----
8
Source. 1.00E+04 6.00E+01 0.00E+00 -1.00E+00 | 14GEMA-A 10038.4 60. 0.0 -1.
Source. 1.00E+04 6.00E+01 -1.20E+02 -1.00E+00 | 14GEMA-B 10038.4 60. -120.0 -1.
Source. 1.00E+04 6.00E+01 1.20E+02 -1.00E+00 | 14GEMA-C 10038.4 60. 120.0 -1.
Blank card ends electric network sources. | BLANK CARD ENDING SOURCE CARDS

```

List of input elements that are connected to each node. Only the physical connections of multi-phase lines are shown (capac and inductive coupling are ignored). Repeated entries indicate parallel connections. Switches are included, although sou (including rotating machinery) are omitted -- except that U.M. usage produces extra, internally-defined nodes "UMXXXX".

```

From bus name | Names of all adjacent busses.
-----
GEMA-A | MANT-A*
MANT-A | GEMA-A*MANT-B*MANT-C*
GEMA-B | MANT-B*
MANT-B | MANT-A*GEMA-B*MANT-C*
GEMA-C | MANT-C*
MANT-C | MANT-A*MANT-B*GEMA-C*
TMAN-A | TERRA *TERRA *SECA-A*
SECA-A | TMAN-A*SEIN-A*
TMAN-B | TERRA *TERRA *SECA-B*
SECA-B | TMAN-B*SEIN-B*
TMAN-C | TERRA *TERRA *SECA-C*
SECA-C | TMAN-C*SEIN-C*
TSEI-A | TERRA *TERRA *TERRA *AUX-A *
AUX-A | TSEI-A*SEIN-A*
SEI6-A | TERRA *
SEI1-A | TERRA *SEI1-B*SEI1-C*
SEI1-B | TERRA *SEI1-A*SEI1-C*
TSEI-B | TERRA *TERRA *TERRA *AUX-B *
AUX-B | TSEI-B*SEIN-B*
SEI6-B | TERRA *
SEI1-C | TERRA *SEI1-A*SEI1-B*
TSEI-C | TERRA *TERRA *TERRA *AUX-C *
AUX-C | TSEI-C*SEIN-C*
SEI6-C | TERRA *
SEIN-A | SECA-A*AUX-A *
SEIN-B | SECA-B*AUX-B *
SEIN-C | SECA-C*AUX-C *
TERRA | TMAN-A*TMAN-A*TMAN-B*TMAN-B*TMAN-C*TMAN-C*TSEI-A*TSEI-A*TSEI-A*SEI6-A*SEI1-A*SEI1-B*TSEI-B*TSEI-B*TSEI-B*
SEI6-B*SEI1-C*TSEI-C*TSEI-C*TSEI-C*SEI6-C*

```

Pi-equivalent branches of distributed circuits are added to the table of List Size 3 between indices 21 and 26. Nonlinear and time-varying resistances are ignored during the phasor solution, while nonlinear inductors are linearized.

```

Sinusoidal steady-state phasor solution, branch by branch. All flows are away from a bus, and the real part, magnitude, (
"P"
is printed above the imaginary part, the angle, or "Q". The first solution frequency = 6.00000000E+01 Hertz.
Bus K Phasor node voltage Phasor branch current Power flow Power
loss Bus M Rectangular Polar Rectangular Polar P and Q P :
Q
GEMA-A 10038.4 10038.4 22.745487794239 2640.9684699199 114164.15233685 20226.6719:
0.0 0.0 2640.8705197143 89.5065308 -.13255057313E8 812205.498
MANT-A 10653.326820212 10653.346764973 -22.74548779424 2640.9684699199 -93937.48040542
-20.61447312162 -0.1108687 -2640.870519714 -90.4934692 .140672628113E8
GEMA-B -5019.2 10038.4 2275.6882142809 2640.9684699199 114164.15233684 20226.6719:
-8693.50941335 -120.0000000 -1340.133430108 -30.4934692 -.13255057313E8 812205.498

```

	MANT-B	-5344.516067515 -9215.744424561	10653.346764973 -120.1108687	-2275.688214281 1340.1334301084	2640.9684699199 149.5065308	-93937.48040542 .140672628113E8	
GEMA-C		-5019.2 8693.5094133497	10038.4 120.0000000	-2298.433702075 -1300.737089606	2640.9684699199 -150.4934692	114164.15233686 -.13255057313E8	20226.6719: 812205.498
	MANT-C	-5308.810752697 9236.3588976827	10653.346764973 119.8891313	2298.4337020751 1300.7370896059	2640.9684699199 29.5065308	-93937.48040544 .140672628113E8	
SECA-A		162018.99101897 92733.129650168	186680.44028639 29.7850796	79.338819209264 -140.1632080117	161.06015371179 -60.4881441	-71688.7519074 .15033219274E8	11321.6758: 370506.348
	TMAN-A	157945.83396362 90589.085404909	182080.39120389 29.8362226	-79.33881920926 140.16320801174	161.06015371179 119.5118559	83010.427752855 -.14662712925E8	
	MANT-A	10653.326820212 -20.61447312162	10653.346764973 -0.1108687	-750.9809088289 1327.0013166076	1524.7638570296 119.5065308	-.40139002452E7 -.70607488205E7	93937.48040 14067262.81:
	MANT-B	-5344.516067515 -9215.744424561	10653.346764973 -120.1108687	750.98090882888 -1327.001316608	1524.7638570296 -60.4934692	.410783772564E7 -.70065139909E7	
	TMAN-A	157945.83396362 90589.085404909	182080.39120389 29.8362226	78.044555627973 -137.9066056871	158.45877872587 -60.4934692	-83010.42775283 .144258793798E8	-83010.4277 14425879.37:
	TERRA	0.0 0.0	0.0 0.0	-78.04455562797 137.90660568706	158.45877872587 119.5065308	0.0 0.0	
SECA-B		-700.2494600056 -186679.126943	186680.44028639 -90.2149204	-161.0543084187 1.3721710643881	161.06015371179 179.5118559	-71688.75190735 .15033219274E8	11321.6758: 370506.348
	TMAN-B	-520.4677155616 -182079.6473369	182080.39120389 -90.1637774	161.05430841873 -1.372171064388	161.06015371179 -0.4881441	83010.427752805 -.14662712925E8	
	MANT-B	-5344.516067515 -9215.744424561	10653.346764973 -120.1108687	1524.707305452 -13.13211350085	1524.7638570296 -0.4934692	-.40139002452E7 -.70607488205E7	93937.48040 14067262.81:
	MANT-C	-5308.810752697 9236.3588976827	10653.346764973 119.8891313	-1524.707305452 13.132113500854	1524.7638570296 179.5065308	.410783772564E7 -.70065139909E7	
	TMAN-B	-520.4677155616 -182079.6473369	182080.39120389 -90.1637774	-158.4529016887 1.3647350426371	158.45877872587 179.5065308	-83010.42775282 .144258793798E8	-83010.4277 14425879.37:
	TERRA	0.0 0.0	0.0 0.0	158.45290168866 -1.364735042637	158.45877872587 -0.4934692	0.0 0.0	
SECA-C		-161318.741559 93945.99729287	186680.44028639 149.7850796	81.715489209461 138.79103694736	161.06015371179 59.5118559	-71688.7519073 .15033219274E8	11321.6758: 370506.348
	TMAN-C	-157425.3662481 91490.561931961	182080.39120389 149.8362226	-81.71548920946 -138.7910369474	161.06015371179 -120.4881441	83010.42775276 -.14662712925E8	
	MANT-C	-5308.810752697 9236.3588976827	10653.346764973 119.8891313	-773.7263966231 -1313.869203107	1524.7638570296 -120.4934692	-.40139002452E7 -.70607488205E7	93937.48040 14067262.81:
	MANT-A	10653.326820212 -20.61447312162	10653.346764973 -0.1108687	773.72639662312 1313.8692031067	1524.7638570296 59.5065308	.410783772564E7 -.70065139909E7	
	TMAN-C	-157425.3662481 83010.42775284	182080.39120389 149.8362226	80.40834606069 136.54187064442	158.45877872587 59.5065308	-83010.42775284 .144258793798E8	- 14425879.37:
	TERRA	0.0 0.0	0.0 0.0	-80.40834606069 -136.5418706444	158.45877872587 -120.4934692	0.0 0.0	
SECA-A		162018.99101897 92733.129650168	186680.44028639 29.7850796	-79.33881920926 140.16320801174	161.06015371179 119.5118559	71688.751907357 -.15033219274E8	71688.75190 15033219.27:
	SEIN-A	171750.37137822 96871.462249677	197185.8774531 29.4240746	.4263256415E-13 .2842170943E-13	.5123796534E-13 33.6900675	.50377056385E-8 -.3757801608E-9	
SECA-B		-700.2494600056 -186679.126943	186680.44028639 -90.2149204	161.05430841873 -1.372171064388	161.06015371179 -0.4881441	71688.751907355 -.15033219274E8	71688.75190 15033219.27:
	SEIN-B	-1982.038479146 -197175.9158478	197185.8774531 -90.5759254	.4263256415E-13 .1221245327E-13	.443472608E-13 15.9848015	-.1246250521E-8 -.4190954664E-8	
SECA-C		-161318.741559 93945.99729287	186680.44028639 149.7850796	-81.71548920946 -138.7910369474	161.06015371179 -120.4881441	71688.751907355 -.15033219274E8	71688.75190 15033219.27:
	SEIN-C	-169768.3328991 100304.45359811	197185.8774531 149.4240746	-.99475983E-13 -.852651283E-13	.1310176068E-12 -139.3987054	.41676998471E-8 -.122266014E-7	
	TMAN-A	157945.83396362 90589.085404909	182080.39120389 29.8362226	1.2942635812919 -2.256602324686	2.6014173578333 -60.1637774	.9592326933E-12 236833.54509944	.959232693: 236833.548
	TERRA	0.0 0.0	0.0 0.0	-1.294263581292 2.2566023246859	2.6014173578333 119.8362226	0.0 0.0	
	TMAN-B	-520.4677155616 -182079.6473369	182080.39120389 -90.1637774	-2.601406730063 .00743602175117	2.6014173578333 179.8362226	.5490052857E-13 236833.54509944	.549005285: 236833.548
	TERRA	0.0 0.0	0.0 0.0	2.601406730063 -.0074360217512	2.6014173578333 -0.1637774	0.0 0.0	
	TMAN-C	-157425.3662481 91490.561931961	182080.39120389 149.8362226	1.3071431487711 2.2491663029348	2.6014173578333 59.8362226	-.306954462E-11 236833.54509944	-.30695446: 236833.548

TERRA 0.0 0.0 -1.307143148771 2.6014173578333 0.0
 0.0 0.0 -2.249166302935 -120.1637774 0.0
 Total network loss P-loss by summing injections = 3.424924570105E+05

Output for steady-state phasor switch currents.

Node-K	Node-M	I-real	I-imag	I-magn	Degrees	Power	Reactive
SEIN-A	AUX-A	Open	Open	Open	Open	Open	Open
SEIN-B	AUX-B	Open	Open	Open	Open	Open	Open
SEIN-C	AUX-C	Open	Open	Open	Open	Open	Open

Solution at nodes with known voltage. Nodes that are shorted together by switches are shown as a group of names, with the printed result applying to the composite group. The entry "MVA" is $\sqrt{P^2 + Q^2}$ in units of power, while "P.F." is the associated power factor.

Node name	Source Rectangular	node voltage Polar	Injected Rectangular	source current Polar	Injected P and Q	source MVA and
GEMA-A	10038.4 0.0	10038.4 0.0	22.745487794239 2640.8705197143	2640.9684699199 89.5065308	114164.15233685 -.13255057313E8	.132555489 0.001
GEMA-B	-5019.2 -8693.50941335	10038.4 -120.0000000	2275.6882142809 -1340.133430108	2640.9684699199 -30.4934692	114164.15233685 -.13255057313E8	.132555489 0.001
GEMA-C	-5019.2 8693.5094133497	10038.4 120.0000000	-2298.433702075 -1300.737089606	2640.9684699199 -150.4934692	114164.15233687 -.13255057313E8	.132555489 0.001

---- Initial flux of coil "TMAN-A" to " " = 2.40295012E+02
 ---- Initial flux of coil "TMAN-B" to " " = -4.82981265E+02
 ---- Initial flux of coil "TMAN-C" to " " = 2.42686253E+02

Card of names for time-step loop output. | AUX-A AUX-B AUX-C
 Blank card ending requests for output variables. | BLANK CARD ENDING OUTPUT CARDS
 Column headings for the 3 EMTP output variables follow. These are divided among the 5 possible classes as follows
 First 3 output variables are electric-network voltage differences (upper voltage minus lower voltage);

Step	Time	AUX-A	AUX-B	AUX-C
0	0.0	0.0	0.0	0.0

1.00000000E-03	sec.			

2.05000000E-03	sec.			
100	.005	-143942.56	171801.703	-41556.915

5.05000000E-03	sec.			
500	.025	-132465.8	-70929.074	226651.346
1000	.05	155657.85	27455.5742	-193676.92
1500	.075	-68571.645	-71975.663	139698.566
%% % % %				
Final time step,				
PLTFIL				
dumps plot data to ".PL4" disk file.				
Done dumping plot points to C-like disk file.				
2000	0.1	165681.396	53383.2746	-213436.7

Extrema of output variables follow. Order and column positioning are the same as for the preceding time-step loop output.

Variable maxima : 222255.778 210472.463 266583.29
 Times of maxima : .03395 .02125 .04285
 Variable minima : -240814.13 -238708.49 -308484.13
 Times of minima : .07215 .08015 .05105

Blank card terminating all plot cards. | BLANK CARD ENDING PLOT CARDS
 Seconds for overlays 1-5 : 6.152 0.000 6.152 --- (CP: I/O; tot)
 Seconds for overlays 6-11 : 2.691 0.000 2.691
 Seconds for overlays 12-15 : 0.551 0.000 0.551
 Seconds for time-step loop : 4.121 0.000 4.121
 Seconds after DELTAT-loop : 0.273 0.000 0.273

 Totals : 13.789 0.000 13.789

Capítulo X

Injeção de Surtos em Subestações

1. Introdução

Os equipamentos de uma subestação estão sujeitos, entre outras solicitações do sistema, à incidência de sobretensões transitórias provocadas pela queda de descargas atmosféricas nas linhas de transmissão. Considerando que a atenuação e a distorção dos surtos atmosféricos ocorrem muito rapidamente, somente os surtos originados nas proximidades das subestações podem alcançar os equipamentos com valores importantes.

Os surtos atmosféricos podem ser provocados por incidência de descargas atmosféricas diretamente nos cabos das fases, usualmente denominada de falha de blindagem, ou por incidência nas torres e/ou cabos pára-raios, usualmente denominados de "backflashover".

Neste último caso a transferência do surto de tensão para a fase se verifica quando há a ruptura do isolamento das cadeias de isoladores, em virtude da elevação da tensão na parte superior da torre de transmissão.

Devido a alta frequência do fenômeno de propagação dos surtos atmosféricos é importante que a linha de transmissão, os barramentos e os equipamentos da subestação sejam modelados de forma conveniente. A efetiva proteção dos equipamentos da subestação é alcançada através do correto posicionamento dos dispositivos de proteção. Geralmente se utilizam pára-raios ou centelhadores e as subestações são protegidas por cabos de blindagem para evitar a incidência de raios diretamente nos barramentos e equipamentos da subestação.

Os pára-raios geralmente são utilizados na entrada da subestação, próximos aos equipamentos principais. A necessidade de pára-raios próximos aos equipamentos principais está associada a eventual elevação da sobretensão em relação a tensão no terminal do pára-raios, em virtude das características de propagação do surto no interior da subestação (frente de onda de poucos μ s e velocidade de propagação próxima a da luz). As reflexões nos diversos pontos de descontinuidade dos barramentos (conexões com outros barramentos, terminações e conexões com equipamentos) e as distâncias entre os pára-raios e os equipamentos podem fazer com que a tensão alcance níveis perigosos em alguns pontos da subestação.

Este fato deve ser evitado localizando-se os pára-raios nos locais apropriados, inclusive aumentando a sua quantidade, caso necessário.

A simulação dos componentes envolvidos em estudos de propagação de surtos em subestações inclui os seguintes modelos:

- ⇒ modelo do surto a ser injetado
- ⇒ modelo da linha de transmissão
- ⇒ modelo dos barramentos
- ⇒ modelos dos equipamentos da subestação

Neste capítulo serão apresentados os aspectos relacionados com a modelagem de cada um dos componentes acima indicados, visando a simulação da propagação de surtos atmosféricos em subestações com a utilização do ATP.

2. Características das Sobretensões Atmosféricas

As solicitações transitórias causadas por surtos atmosféricos são fortemente influenciadas pelas características das descargas atmosféricas, as quais são geralmente definidas por distribuições estatísticas de intensidades de corrente e tempos de frente de onda. A Figura 1 apresenta uma forma de onda típica de uma descarga atmosférica.

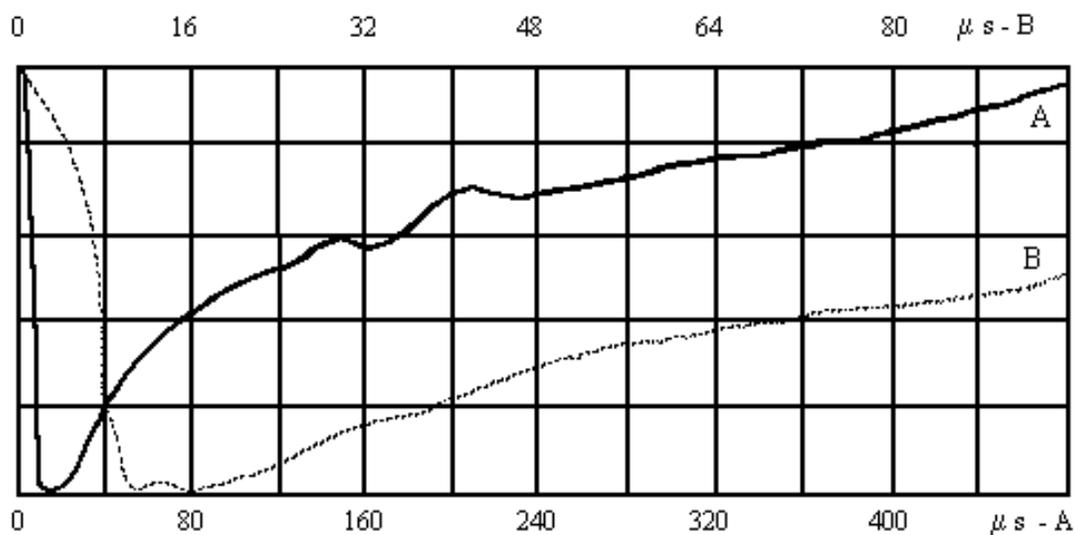


Figura 1 - Forma de onda típica de uma descarga atmosférica

A literatura existente apresenta farto material sobre as características das descargas atmosféricas. As primeiras informações consideravam distribuições independentes para intensidades de corrente e tempos de frente de onda. Posteriormente foi introduzido a taxa de crescimento como parâmetro estatístico no lugar da frente de onda e mais recentemente se consideram distribuições estatísticas das formas de onda com as intensidades. Para efeito deste item o surto será considerado com a forma de onda típica apresentada na Figura 1 e intensidade de corrente apropriada.

A incidência de um surto de corrente diretamente num dos cabos das fases provoca um surto de tensão que se propaga a partir do ponto de incidência nas duas direções possíveis, com igual intensidade e de magnitude igual ao produto da intensidade de corrente dividida por duas vezes a impedância de surto do cabo condutor, tal como indicado na Figura 2.

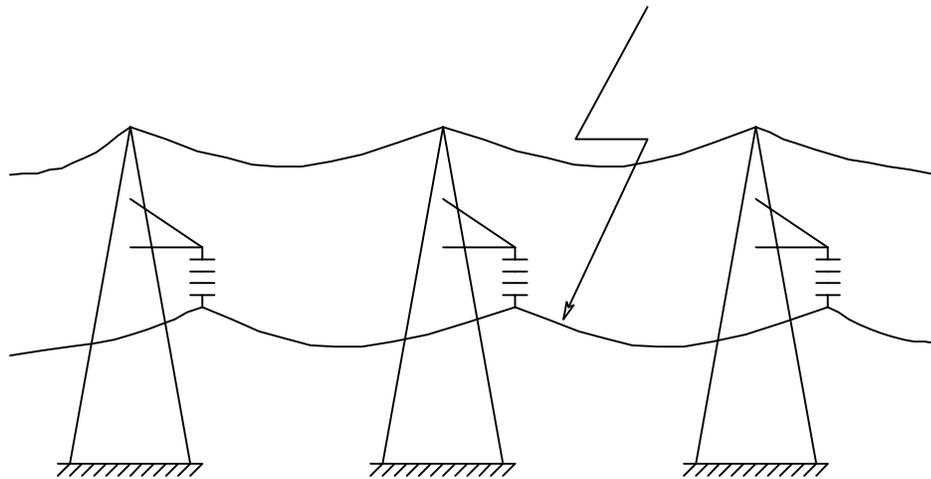


Figura 2 - Incidência Direta no Cabo Fase

Desprezando-se a atenuação e a distorção inerentes ao surto de tensão, verifica-se que, caso o surto de tensão seja inferior ao isolamento das cadeias de isoladores, o mesmo se propagará indefinidamente pela linha de transmissão até alcançar as subestações nas duas extremidades. Na prática, a atenuação e a dispersão são significativas e são importantes apenas para os surtos originados nas proximidades das subestações. Os surtos induzidos nos cabos pára-raios também são ignorados.

As considerações acima tem sido tradicionalmente utilizadas para os estudos de coordenação de isolamento de subestações, onde se considera que o surto injetado é sempre limitado pelo isolamento da linha de transmissão.

Quando as descargas atmosféricas atingem os cabos pára-raios ou as torres das linhas de transmissão ocorre um processo de propagação bem mais complexo do que o acima apresentado, uma vez que há diversos caminhos para os surtos. A Figura 3 mostra a incidência de uma descarga atmosférica no cabo pára-raios, no meio do vão.

A propagação, devido à incidência de uma descarga atmosférica no cabo pára-raios, inicia-se da mesma forma já anteriormente descrita. Devido aos diversos pontos de descontinuidade existentes, e considerando a importância da tensão induzida, há um complexo processo da propagação de ondas, que

poderá provocar uma elevação da tensão da cadeia de isoladores, provocando um "flashover" e injetando um surto de tensão de amplitude significativa no cabo fase. Este surto é que, então, poderá

alcançar os equipamentos da subestação. Neste caso é necessário uma representação mais elaborada para a modelagem do surto injetado, envolvendo os componentes indicados na Figura 3.

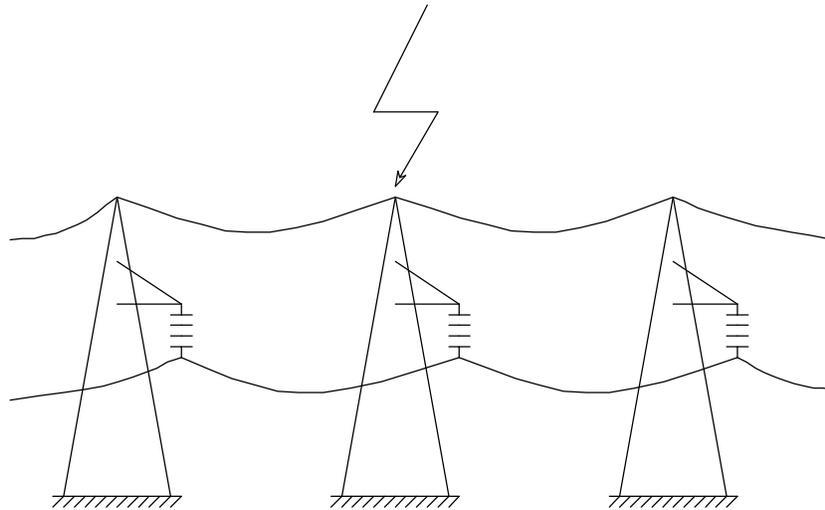


Figura 3 - Incidência de uma descarga atmosférica no cabo pára-raios

Uma análise aprofundada de todos os componentes envolvidos na modelagem dos surtos originados por descargas atmosféricas foge ao escopo deste capítulo e, por este motivo, apenas alguns aspectos referentes a modelagem dos componentes são abordados.

Em se tratando de um fenômeno de alta frequência, uma vez que descargas atmosféricas tem frente de onda na faixa de poucos microssegundos, os cabos pára-raios e das fases e as torres das linhas de transmissão são representados por sua impedância de surto e tempo de propagação. O sistema de aterramento pode ser representado por uma impedância equivalente.

3. Modelagem dos Principais Componentes no ATP

3.1. Modelo do Surto de Tensão ou Corrente

O ATP dispõe de vários tipos diferentes de fontes para a excitação das redes elétricas. No caso específico em questão, o interesse está voltado para a modelagem de surto de tensão ou corrente e diversas alternativas podem ser aplicadas. Entretanto, antes de se iniciar a análise das alternativas dos modelos específicos, é importante verificar a questão da equivalência das fontes e sua incorporação ao modelo completo utilizado nos estudos de injeção de surtos.

O conceito básico, que se aplica a qualquer equivalente da rede e para qualquer tipo de estudo, consiste em se utilizar a menor representação possível do sistema em análise, de forma a minimizar o tempo de processamento e evitar a inclusão de componentes desnecessários. Em pontos apropriados do sistema a

ser modelado devem ser utilizados equivalentes que reproduzem o comportamento transitório da parte desprezada.

No caso específico em análise, o problema consiste em injetar um surto de tensão ou corrente, com forma de onda e amplitude conhecidas, na linha de transmissão ou na entrada da subestação, sem que a fonte modifique a impedância vista pelas reflexões provenientes do interior da subestação. Quando se utiliza uma fonte de tensão o modelo apresentado na Figura 4 deve ser aplicado.

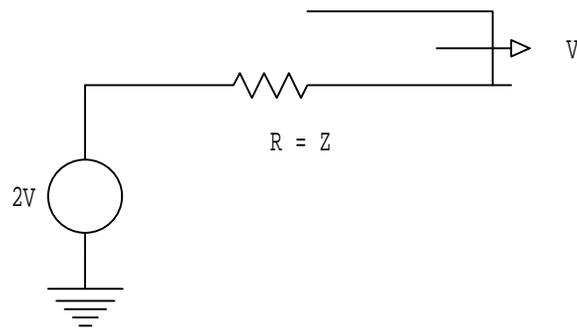


Figura 4 - Fonte de tensão equivalente para injeção de surtos de tensão

A tensão da fonte deve ser igual a duas vezes o valor do surto de tensão desejado e a impedância de surto (Z) deve ser igual a impedância de surto do barramento onde o modelo será conectado para injetar o surto na subestação. Quando se utiliza uma fonte de corrente o modelo apresentado na Figura 5 deve ser aplicado.

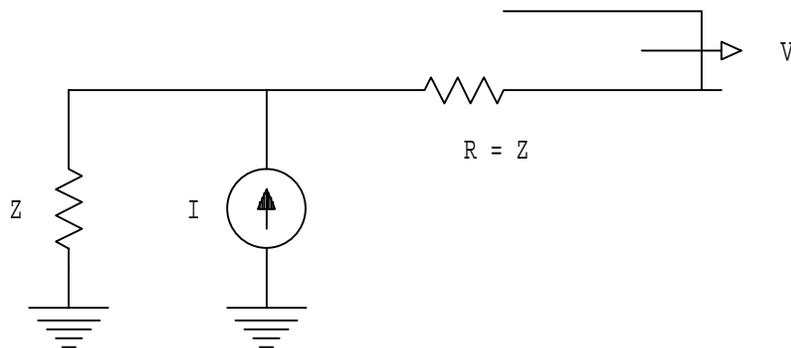


Figura 5 - Fonte de corrente equivalente para injeção de surtos de tensão

A magnitude da fonte de corrente deve ser estipulada de tal forma que o surto de tensão seja igual a $Z_b I / 2$, sendo Z_b a impedância de surto do barramento onde o modelo será conectado para injetar o surto na subestação.

Nos dois modelos acima, as reflexões provenientes das discontinuidades existentes no interior da subestação encontram uma impedância de surto igual à do barramento por onde estão se propagando, não havendo, portanto, reflexões em direção à subestação. Na prática este modelo está no lugar de uma

linha de transmissão, onde os surtos provenientes da subestação se propagariam até encontrar uma discontinuidade na extremidade oposta. Considerando a disparidade entre a duração do transitório no interior da subestação e o tempo de propagação da linha de transmissão, não há a menor necessidade de se modelar a linha de transmissão. Para efeito do transitório dentro da subestação tudo se passa como se a linha de transmissão tivesse comprimento infinito.

Deve ser ressaltado que uma impedância de surto tem dimensão de uma resistência.

Os modelos de fontes existentes no ATP , aplicáveis a modelagem de surtos de tensão ou corrente , e que mais se aproximam da forma de onda mostrada na Figura 1 são os seguintes:

⇒ two-slope ramp (type 13)

⇒ two-exponentials surge function (type 15)

As Figuras 6 e 7 apresentam os dois tipos de fontes em questão.

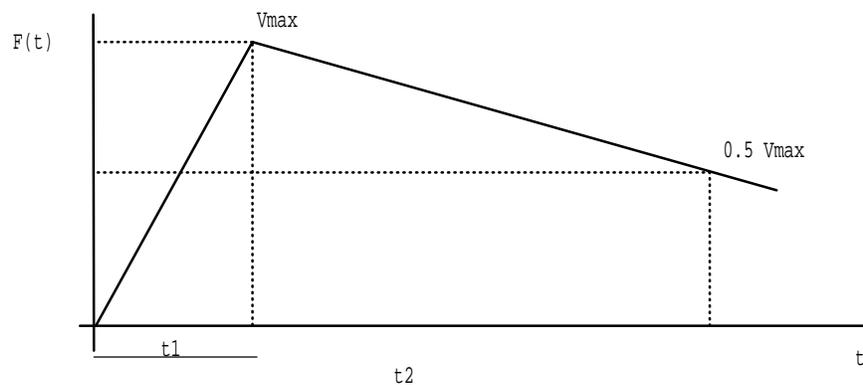


Figura 6 - Forma de onda da fonte tipo 13

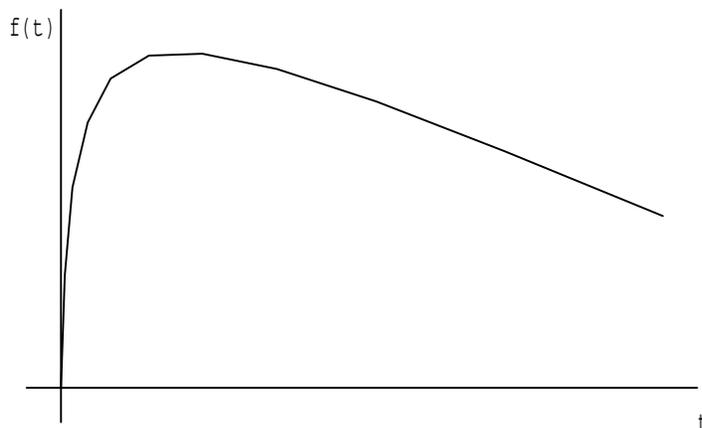


Figura 7 - Forma de onda da fonte tipo 15

A especificação dos parâmetros necessários a modelagem da fonte tipo 13 está indicada no item 3 da seção VII do manual do ATP, não havendo dificuldades para a sua interpretação. No caso da fonte tipo 15, item 5 da seção VII do manual do ATP, é necessário alguma informação adicional, tal como apresentado no anexo I.

3.2. Modelo da Linha de Transmissão

Quando o surto é injetado diretamente na subestação não há necessidade de se modelar a linha de transmissão, tal como mencionado no item anterior. Entretanto, quando o surto é injetado nos cabos pára-raios ou nas torres de uma linha de transmissão é necessário se estabelecer um modelo que represente os primeiros vãos da linha de transmissão, incluindo-se as torres, cabos (pára-raios e de fase) e impedância de aterramento das torres, tendo como base a Figura 3.

As torres e os cabos são representados por impedâncias de surto e tempos de propagação e a impedância do sistema de aterramento por uma resistência equivalente. A quantidade de vãos geralmente é estipulada em 3 ou 4 e o ponto de incidência simulado em cada uma delas para efeito de verificação nas sobretensões resultantes no interior da subestação.

A modelagem de linha de transmissão é baseada, portanto, nos modelos de linhas de transmissão e de elementos R, L, C concentrados do ATP.

3.3. Modelo dos Barramentos

Os barramentos são representados como se fossem linhas de transmissão de pouco comprimento, ou seja: impedâncias de surto e tempos de propagação.

É importante examinar as configurações correspondentes às diversas possibilidades de operação da subestação. Geralmente as configurações envolvendo as maiores distâncias e a menor quantidade de equipamentos são as que levam às maiores solicitações nos equipamentos.

A modelagem da subestação deve ser baseada na localização física exata dos equipamentos e seus pontos de aterramento à malha de terra.

Os modelos de linhas de transmissão do ATP devem, portanto, serem utilizados para a representação dos barramentos.

3.4. Modelo dos Equipamentos

Os equipamentos devem ser representados por suas capacitâncias e/ou modelos próprios para altas frequências, quando disponíveis. Geralmente os transformadores, divisores capacitivos, seccionadoras e disjuntores são representados apenas por suas capacitâncias.

Os pára-raios são representados por suas características não-lineares apropriadas ou modelos específicos para altas frequência.

O ATP, além dos modelos já citados anteriormente, dispõe de modelos para resistores não-lineares, os quais devem-ser utilizados para a representação dos pára-raios. O Anexo II apresenta informações adicionais sobre a modelagem de pára-raios.

4. Exemplo de Simulação de um Caso de Injeção de Surtos em Subestações

A Figura 8 mostra um arquivo de entrada de dados para o ATP, o qual será utilizado como exemplo para apresentação dos modelos dos diversos componentes incluídos na simulação.

```

BEGIN NEW DATA CASE
-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----
C INJECAO DE SURTO EM SUBESTACOES FILE = ATP\SCRATCH\EXE6.DAT
C DADOS MISCELANEOS
  0.01E-6 .000025
    100      1                1                1
C ELEMENTOS R L C
  FONTE      CO                320.
  TRAFO
    TRAFO                3.E-03
C BARRAMENTOS REPRESENTADOS POR Z E TRAVEL TIME
-1 CO PR1                320.0.05E-6        2 0
-1 PR1 TRAFO                320.0.20E-6        2 0
C PARA-RAIOS
-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----
99 PR1
    1.0                457000.
    10.0               481000.
    100.0              517000.
    500.0              554000.
    1000.0             573000.
    3000.0             610000.
    5000.0             631000.
    10000.0            673000.
    15000.0            708000.
    20000.0            743000.
    9999
-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----
BLANK CARD ENDING BRANCH CARDS
BLANK CARD ENDING SWITCH CARDS
C FONTES
12 FONTE      3.8E06                1.0E-6
BLANK CARD ENDING SOURCE CARDS
  CO TRAFO PR1
BLANK CARD ENDING OUTPUT CARDS
BLANK CARD ENDING PLOT CARDS
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK CARD ENDING ALL CASES
-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----

```

Figura 8 - Entrada de dados para um caso simplificado

Nos próximos itens serão apresentados todos os componentes utilizados na montagem do caso.

4.1 Miscellaneous data cards

```
-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----+--  
BEGIN NEW DATA CASE
```

Instrução opcional utilizado em todo início de arquivo do ATP para sinalizar o início de um novo caso (item II-A do ATP Rule Book).

4.2 Floating - point miscellaneous data card

```
-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----+--  
0.01E-6 .000025
```

Primeira instrução obrigatória com dados para o processamento do caso, tais como: Intervalo de integração, tempo total de simulação, frequências para definição dos parâmetros referentes às indutâncias e capacitâncias, tolerâncias e tempo para re-iniciar um caso.

Neste caso foi especificado um intervalo de integração de 10 ns e tempo total de simulação de 25 μ s, uma vez que se trata de um fenômeno de frequência muito elevada.

Os valores das indutâncias e capacitâncias foram especificados em milihenries e microfarads porque XOPT e COPT foram deixados em branco.

Os demais parâmetros não foram especificados e, por este motivo, valores "default" são assumidos, o que ocorre na maioria dos casos com relação a estes parâmetros (item II-B do ATP Rule Book).

4.3 Integer miscellaneous data card

```
-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----+--  
100 1 1 1
```


4.4.3 Pára-raios de ZnO

```
-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----+-----
99  PR1          1.0          457000.          1.0          1
          10.0          481000.
          100.0          517000.
          500.0          554000.
          1000.0          573000.
          3000.0          610000.
          5000.0          631000.
          10000.0          673000.
          15000.0          708000.
          20000.0          743000.
          9999
```

O pára raios de Zno foi modelado através do elemento não-linear tipo 99, o qual necessita de uma instrução inicial com o código do modelo (99), além de outras informações, tal como indicado a seguir. Foram especificados o tipo (99), a tensão de disparo (0.0, porque o ZnO não tem centelhador), um TDELAY = 1.0 s para que o pára-raios mantenha a condução e não interrompa a corrente e JUMP = 1 para indicar que o início de condução é no primeiro segmento da característica não-linear.

Após as instruções iniciais é necessário indicar os pares de pontos que determinam a característica não-linear do pára-raios, terminada por 9999.

4.5 Switch Cards

Como não há necessidade de chaves apenas um cartão em branco foi utilizado.

4.6 Static Electric Network Sources

```
-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----+-----
12 FONTE  3.8E06          1.0E-6
```

O surto de tensão foi modelado de forma simplificada, através de uma fonte do tipo 12, a qual tem um tempo de crescimento até atingir um valor constante. No caso em questão a magnitude é de 3800 kV, de forma a injetar um surto de 1900 kV (correspondente ao isolamento da linha de transmissão), e a frente de onda é de 1 μ s. Os demais parâmetros não foram especificados (TSTART, TSTOP e ST).

4.7 Output Specification Cards

```
-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----+-----  
CO TRAF0 PR1  
BLANK CARD ENDING OUTPUT CARDS
```

Em complemento às opções existentes na maioria dos componentes da rede elétrica, para as variáveis dos ramos (coluna 80 em cada componente), há a possibilidade de se especificar todos os tipos de variáveis nesta parte do arquivo. Geralmente estas informações são utilizadas somente para as tensões das barras. No caso se especificou a tensão em CO, TRAF0 e PR1.

4.8 Cards for Batch-mode Plotting

```
-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----+-----  
PRINTER PLOT  
TENSÃO NO TRANSFORMADOR - TRAF0  
1452.5 0.0 25. TRAF0  
BLANK CARD ENDING PLOT CARDS
```

A saída gráfica dos resultados, no mesmo processamento, pode ser obtida através da impressora ou de registradora gráfica contínua (Calcomp). Existe uma grande variedade de instruções para a especificação de gráficos no ATP (seção XIV do Rule Book), mas apenas uma delas é essencial para a obtenção de um gráfico.

No exemplo em questão, assumindo que o usuário deseja obter gráficos juntamente com a saída impressa e no mesmo processamento, foi especificado um título para o gráfico (TENSÃO NO TRANSFORMADOR - TRAF0) e as informações essenciais para a sua obtenção, tais como: a definição do tipo de variável (4 = tensão de nó), tipo de unidades para a escala (5 = μ s), a escala do eixo horizontal (2.5 μ s/ polegada), o tempo correspondente ao início do gráfico (0.0 μ s), o tempo correspondente ao seu final (25.0 μ s) e o nome da variável a ser traçada (TRAF0).

Na prática, a versão do ATP para micro-computadores apresenta várias outras opções para a obtenção de gráficos, mais atraentes do que as citadas acima, que são as opções que permitem o processamento de gráficos a parte, após o processamento do caso. É necessário especificar a variável ICAT na instrução apresentada no item 4.3 acima, incluindo o valor 1 ou 2 na coluna 64. A saída das variáveis do caso é salva num arquivo, o qual pode ser processada através das rotinas PCPLOT, TPLOT ou LECLOT para a obtenção dos gráficos desejados.

4.9 Informações Complementares

```
-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----+--  
BEGIN NEW DATA CASE  
BLANK CARD ENDING ALL CASES
```

Com exceção do conjunto de informações para os itens 4.1, 4.2 e 4.3 acima, todos os demais grupos de instruções são terminados por uma instrução em branco. Para terminar o caso é conveniente especificar a instrução BEGIN NEW DATA CASE seguida de um cartão em branco.

Os comentários são inseridos no arquivo através de Cb nas colunas 1 e 2 de cada linha de comentário.

O ATP interpreta a palavra BLANK (a partir de coluna 1) como se a instrução estivesse em branco e o restante do cartão pode ser utilizado como comentário.

Bibliografia

1. R. B. Anderson, A. J. Eriksson, "Lightning Parameters for Engineering Application", Electra N° 69.
2. Alternative Transients Program, K. U. Leuven EMTP Center

ANEXO I

Determinação dos Parâmetros para a Especificação de uma fonte do tipo Dupla Exponencial

A especificação dos parâmetros necessários para a modelagem de uma fonte do tipo dupla exponencial é baseada na seguinte expressão:

$$f(t) = F_1 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$$

A fonte tipo 15 do ATP (dupla exponencial) requer, portanto, a especificação dos parâmetros F_1 , α e β , para que uma determinada forma de onda conhecida possa ser modelada.

A Figura 1, extraída do livro "Traveling Waves on Transmission Systems, L. V. Bewley, Dover" é a base para a determinação dos parâmetros F_1 , α e β indicados acima, para uma onda de magnitude igual a 1000 e forma de onda 3/21 ms.

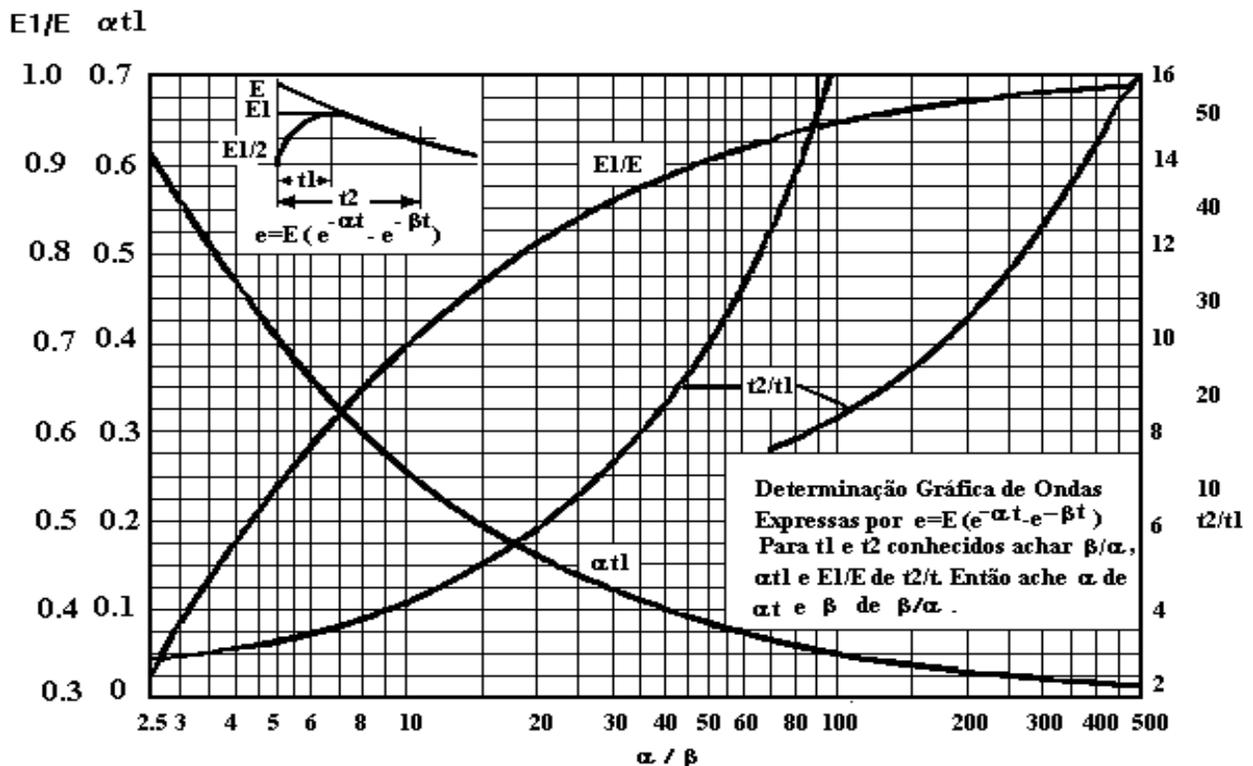


Figura 1 - Especificação de uma forma da onda típica para impulso atmosférico

A Figura 2, mostra a forma de onda padronizada (ABNT, IEC, ANSI) para impulso atmosférico.

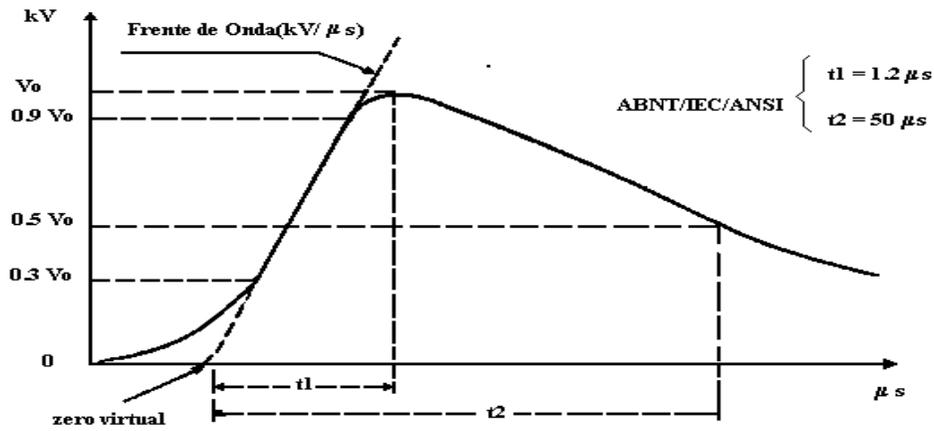


Figura 2 - Forma de onda padronizada para impulso atmosférico

O procedimento, passo a passo, é indicado a seguir.

- a) calcular o valor de $t2/t1$

$$t2/t1 = 7$$

- b) ler na **curva $\beta \times \alpha \times t2/t1$** , o valor de β/α

$$\text{para } t2/t1 = 7 \Rightarrow \beta/\alpha = 28,5$$

- c) ler na **curva $\alpha t1 \times \beta/\alpha$** , o valor de $\alpha t1$

$$\text{para } \beta/\alpha = 28,5 \Rightarrow \alpha t1 = 0,122$$

- d) ler na **curva $E1/E \times \beta/\alpha$** , o valor de $E1/E$

$$\text{para } \beta/\alpha = 28,5 \Rightarrow E1/E = 0,852$$

- e) Calcular

$$\alpha = \text{valor lido em } C/t1 = 0,122/3 = 0,041$$

$$\beta = 28,5 \alpha = 28,5 \times 0,041 = 1,15$$

$$E = E1/0,852 = 1000/0,852 = 1175$$

Portanto, a função resultante é:

$$f(t) = 1175 (e^{-0.041t} - e^{-1.15t})$$

A fonte correspondente ao exemplo acima foi modelada no ATP, tal como indicado no arquivo mostrado na Figura 3. A forma de onda resultante está indicada na Figura 4.

```

-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----+-----
BEGIN NEW DATA CASE
  5.E-9  20.E-6
    100    1      1      1      1
  FONTE  RESO          350.0
-1  RESO  CHFO1          350.0  3.E8  18.0  1  0
-1  CHFO1  PR1          350.0  3.E8   7.0  1  0
-1  PR1    DCP1          350.0  3.E8   6.0  1  0
    DCP1          350.0
BLANK CARD ENDING LLINEAR AND NONLINEAR ELEMENTS
-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----+-----
BLANK CARD ENDING SWITCH COMPONENTS
C FONTE DO SURTO
15 FONTE-1  11.75E3  -0.041E6  -1.150E6
BLANK CARD ENDING SOURCE COMPONENTS
    PR1
BLANK CARD ENDING OUTPUT CARDS
BLANK CARD ENDING PLOT CARDS
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK CARD ENDING ALL CASES
-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----+-----

```

Figura 3 - Arquivo do ATP com a fonte tipo 15

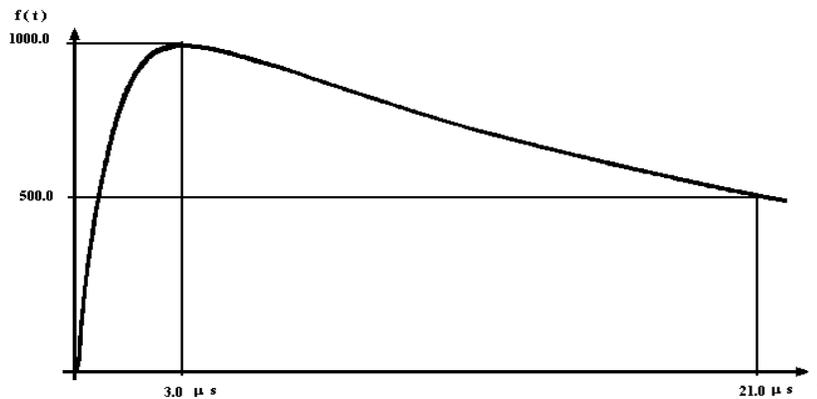


Figura 4 - Forma de onda 3/21 ms

A saída do caso correspondente ao arquivo mostrado na Figura 8 está indicada a seguir :

Alternative Transients Program (ATP), Salford 386 translation. Copyright 1987. Use licensed only by LEC (K.U. Leuven, Belgium).
 Date (dd-mth-yy) and time of day (hh.mm.ss) = 14-Sep-94 11.40.21 Name of disk plot file, if any, is C:\EXE6.pl4
 For information, consult the copyrighted ATP EMTF Rule Book published by LEC in July, 1987. Last major program update: Oct, 1990
 Total length of "LABCOM" tables = 2251555 INTEGER words. "VARDIM" List Sizes follow: 5002 6000 10000 1000 50000
 800 14000 35000 1500 3200 1000 1000100000 400 64800 800 80 100 32000 13200 2000 3000 80000 60 8000 1680 20

 Descriptive interpretation of input data cards. | Input data card images are shown below, all 80 columns, character by character
 0 1 2 3 4 5 6 7 8
 0123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

 Comment card. KOMPAN = 1. | C data:EXE6.DAT
 Marker card preceding new EMTF data case. | BEGIN NEW DATA CASE
 Comment card. KOMPAN = 1. | C INJECAO DE SURTO EM SUBESTACOES FILE = ATP\SCRATCH\EXE6.DAT
 Comment card. KOMPAN = 1. | C DADOS MISCELANEOS
 Misc. data. 1.000E-08 2.500E-05 0.000E+00 | 0.01E-6 .000025
 Misc. data. 100 1 0 0 1 0 0 1 0 0 | 100 1 1 1
 Comment card. KOMPAN = 1. | C -----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
 Comment card. KOMPAN = 1. | C ELEMENTOS R L C
 Series R-L-C. 3.200E+02 0.000E+00 0.000E+00 | FONTE CO 320.
 Series R-L-C. 0.000E+00 0.000E+00 3.000E-09 | TRAF0 3.E-03
 Comment card. KOMPAN = 1. | C BARRAMENTOS REPRESENTADOS POR Z E TRAVEL TIME
 0.000E+00 3.200E+02 5.000E-08 3.200E+02 5.000E-08 | -1 CO PR1 320.0.05E-6 2 0
 0.000E+00 3.200E+02 2.000E-07 3.200E+02 2.000E-07 | -1 PR1 TRAF0 320.0.20E-6 2 0
 Comment card. KOMPAN = 1. | C PARA-RAIOS
 Comment card. KOMPAN = 1. | C -----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
 Type-99 nonlinear R. 0.000E+00 1.000E+00 1 | 99 PR1 0.0 1.0 1 1
 Breakpoint. 1.00000E+00 4.57000E+05 | 1.0 457000.
 Breakpoint. 1.00000E+01 4.81000E+05 | 10.0 481000.
 Breakpoint. 1.00000E+02 5.17000E+05 | 100.0 517000.
 Breakpoint. 5.00000E+02 5.54000E+05 | 500.0 554000.
 Breakpoint. 1.00000E+03 5.73000E+05 | 1000.0 573000.
 Breakpoint. 3.00000E+03 6.10000E+05 | 3000.0 610000.
 Breakpoint. 5.00000E+03 6.31000E+05 | 5000.0 631000.
 Breakpoint. 1.00000E+04 6.73000E+05 | 10000.0 673000.
 Breakpoint. 1.50000E+04 7.08000E+05 | 15000.0 708000.
 Breakpoint. 2.00000E+04 7.43000E+05 | 20000.0 743000.
 Special termination-of-points card. | 9999
 Comment card. KOMPAN = 1. | C -----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
 Blank card ending branches. IBR, NTOT = 4 5 | BLANK CARD ENDING BRANCH CARDS
 Blank card ending switches. KSWTCH = 0. | BLANK CARD ENDING SWITCH CARDS
 High res. added by EMTF across Type-99 elem. 1 | 0 PR1 .1E+11
 Comment card. KOMPAN = 1. | C FONTES
 Source. 3.80E+06 0.00E+00 1.00E-06 0.00E+00 | 12 FONTE 3.8E06 1.0E-6
 Comment card. KOMPAN = 1. | C -----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
 Blank card ends electric network sources. | BLANK CARD ENDING SOURCE CARDS
 Card of names for time-step loop output. | CO TRAF0 PR1
 Blank card ending requests for output variables. | BLANK CARD ENDING OUTPUT CARDS

Column headings for the 4 EMTF output variables follow. These are divided among the 5 possible classes as follows ...

First 3 output variables are electric-network voltage differences (upper voltage minus lower voltage);
 Next 1 output variables are branch currents (flowing from the upper node to the lower node);

Step	Time	CO	TRAF0	PR1	PR1
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
TERRA					
*** Type-99 v-i from " PR1" to " " begins operation on segment 1 at time T = 5.00000000E-08 sec.					
100	.1E-5	776979.98	727033.808	629685.515	4874.81099
200	.2E-5	691663.933	1.060866E7	692496.813	12785.2589
500	.5E-5	694584.047	790616.634	694290.637	13041.5195
600	.6E-5	661784.823	282619.146	660009.916	8453.56138
900	.9E-5	654943.255	465977.538	653958.449	7733.14868
1000	1.E-5	670389.424	993985.701	672538.188	9945.02239
1100	.11E-4	683638.255	460365.094	682464.316	11352.0452
1400	.14E-4	675888.026	432104.012	674688.694	10241.242
1500	.15E-4	657996.319	762801.242	658503.632	8274.24193
1600	.16E-4	680871.273	768737.189	681421.374	11203.0534
1900	.19E-4	680573.419	662143.187	680548.97	11078.4243
2000	.2E-4	664587.193	547752.616	663836.884	8909.15286
2100	.21E-4	669325.66	825678.529	670243.297	9671.82108
2400	.24E-4	673530.285	789473.021	674041.665	10148.8093
*** Final time step, PLTFIL dumps plot data to ".PL4" disk file.					
Done dumping plot points to C-like disk file.					
2500	.25E-4	674708.1	565687.853	674276.114	10182.302

Extrema of output variables follow. Order and column positioning are the same as for the preceding time-step loop output.
 Variable maxima: 776979.98 .1238808E7 701103.125 14014.7321
 Times of maxima: .1E-5 .165E-5 .232E-5 .232E-5
 Variable minima: 0.0 0.0 0.0 0.0
 Times of minima: 0.0 0.0 0.0 0.0

Blank card terminating all plot cards. | BLANK CARD ENDING PLOT CARDS
 Actual List Sizes for the preceding solution follow. 14-Sep-94 11.40.30
 Size 1-10: 5 5 3 1 8 0 7 27 1 10
 Size 11-20: 0 4 -9999 -9999 -9999 0 0 0 23 0
 Size 21-29: 4 0 1 0 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999
 Seconds for overlays 1-5: 6.758 0.000 6.758 --- (CP: I/O; tot)
 Seconds for overlays 6-11: 0.168 0.000 0.168
 Seconds for overlays 12-15: 0.547 0.000 0.547
 Seconds for time-step loop: 1.813 0.000 1.813
 Seconds after DELTAT-loop: 0.277 0.000 0.277

 Totals: 9.563 0.000 9.563

Capítulo XI

Modelagem de Fontes de Excitação para Estudos de Transitórios

1. Introdução

Os estudos de transitórios são geralmente divididos em diferentes categorias, dependendo da duração das solicitações transitórias nos equipamentos do sistema elétrico.

As técnicas de modelagem para o sistema elétrico a ser estudado e as ferramentas mais adequadas para cada tipo de estudo são muito específicas. Elas são muito bem conhecidas pelos especialistas em cada campo específico, mas são muito diferentes em sua natureza. Por exemplo, os programas digitais para estudos na frequência fundamental geralmente utilizam modelos monofásicos, com parâmetros de sequência positiva somente, e sem considerar as características de saturação para os reatores e transformadores. Saturação, propagação de ondas e pára-raios são excluídos na modelagem da rede elétrica.

Por outro lado a análise de fenômenos transitórios necessita de modelos muito mais complexos, mas podem haver problemas de tempo de processamento quando simulações de longa duração e/ou modelos completos de alguns componentes são incluídos no processamento.

É muito claro que há uma grande diferença entre os dois grupos de transitórios, principalmente quanto ao período de interesse na simulação, e que as técnicas de modelagem exploram estas características sob o ponto de simplificações, na hora de serem desenvolvidas as ferramentas digitais específicas.

Entretanto há algumas situações onde as técnicas tradicionais de modelagem tem que ser verificadas antes da realização do estudo propriamente dito, como no caso de sobretensões transitórias de longa duração envolvendo saturação de transformadores de grande porte e no caso de auto-excitação de máquinas síncronas.

As sobretensões transitórias conhecidas como "saturation overvoltages" são exemplos de solicitações transitórias que merecem cuidados especiais em determinados sistemas elétricos.

Estas sobretensões podem ter durações muito superiores às encontradas nos estudos usuais, mas sem alcançar aquelas que caracterizam os estudos de dinâmica (transitórios na frequência fundamental). Os modelos utilizados nos estudos de transitórios de longa duração devem ser validados para um período da ordem de centenas de milissegundos.

O objetivo deste capítulo é apresentar uma discussão básica sobre a modelagem das fontes de excitação do sistema elétrico nos estudos de transitórios de longa duração. Para alcançar este objetivo serão apresentados alguns casos envolvendo as possíveis modelagens das fontes de excitação do sistema, sejam elas máquinas síncronas de fato ou equivalentes de rede.

2. Sobretensões de Longa Duração Envolvendo Saturação de Transformadores

A presença de transformadores de grande potência nas redes elétricas pode ocasionar sobretensões com características muito peculiares, caso algumas manobras sejam efetuadas. Estas sobretensões são conhecidas como "saturation overvoltages" na literatura internacional e são fortemente influenciadas pela característica harmônica da rede elétrica.

As sobretensões de longa duração envolvendo saturação de transformadores podem ser ocasionadas por manobras de energização, rejeição de carga e limpeza de faltas. Normalmente a sua magnitude não é muito alta, mas a duração pode alcançar centenas de milissegundos e o conteúdo de harmônicas ser muito alto. Um exemplo deste tipo de sobretensão pode ser visualizado na Figura 1.

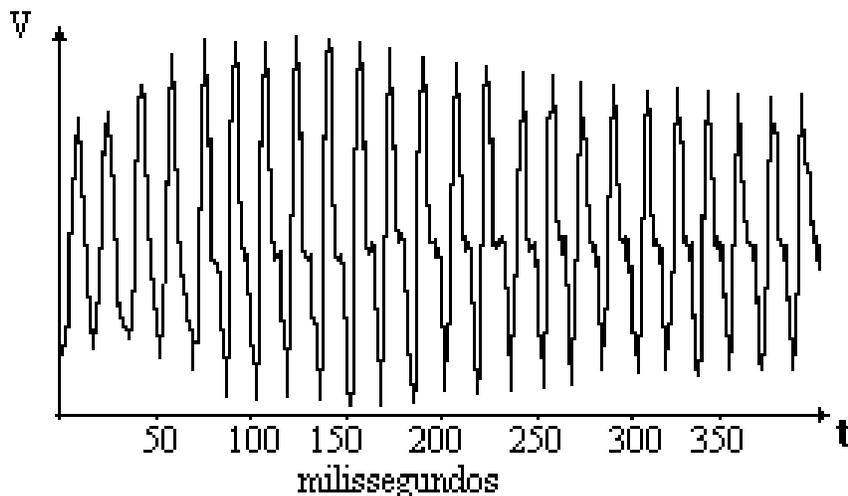


Figura 1 - Exemplo de uma Sobretensão Transitória de Longa Duração

A importância das sobretensões transitórias de longa duração é ainda maior quando pára-raios de óxido de zinco se encontram instalados no sistema elétrico em estudo. Os pára-raios de ZnO podem ser solicitados a conduzir correntes de amplitude moderada por longos períodos. Como usualmente a condução de corrente se faz com amplitudes elevadas e curta duração, o caso em questão pode implicar em valores de energia absorvida maiores dos que os usuais e, portanto, de grande importância para a correta especificação dos pára-raios de ZnO.

Na Figura 2 pode ser visualizado um exemplo de conduções múltiplas em pára-raios de ZnO.

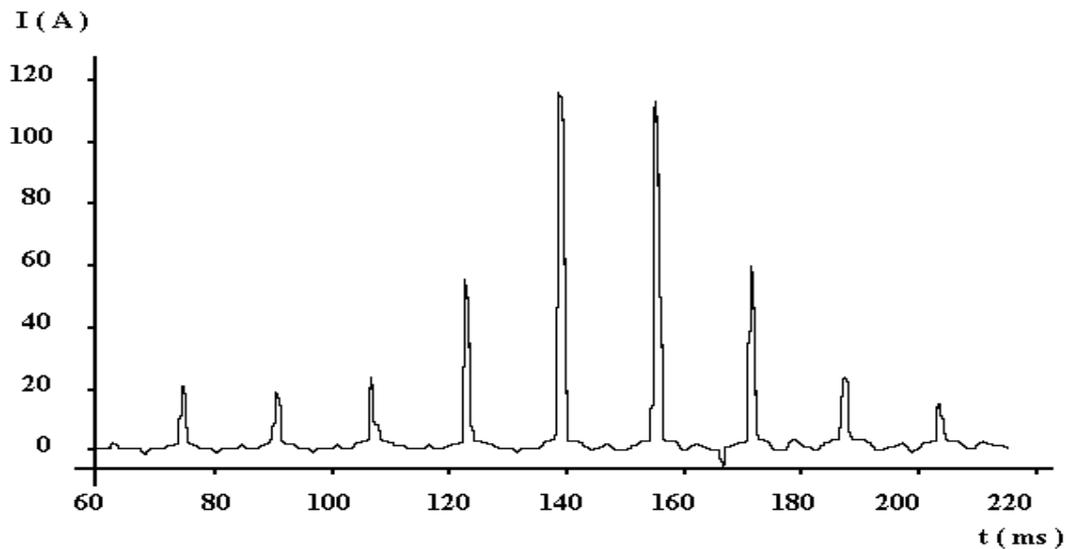


Figura 2 - Exemplo de Múltiplas Conduções em Pára-raios de ZnO

Deve ser observado que a utilização de pára-raios de ZnO em sistemas de potência tem levado a uma maior preocupação com as sobretensões transitórias de longa duração, uma vez que os casos decisivos para a sua especificação tem sido encontrados entre as manobras deste tipo.

3. Modelos de Equivalentes de Rede

A modelagem mais adequada para a realização de um estudo está frequentemente associada ao tipo de fenômeno que está sendo investigado e ao tipo de ferramenta sendo utilizada.

Na prática, os seguintes modelos para máquinas síncronas e/ou equivalentes de rede tem sido empregados:

- ⇒ fonte de tensão constante atrás da reatância subtransitória da máquina ou da reatância equivalente da rede.
- ⇒ fonte de tensão variável com o tempo (magnitude e frequência) atrás da reatância subtransitória da máquina ou da reatância equivalente da rede.
- ⇒ modelo completo da máquina síncrona, mas sem regulador de tensão.
- ⇒ modelo completo da máquina síncrona, incluindo regulador de tensão.

3.1 Fonte de Tensão Constante atrás de Reatância uma Reatância Equivalente

O modelo de fonte de tensão constante é o de uso mais frequente em estudos de transitórios, onde as sobretensões tem acentuado amortecimento e o período total de estudo é inferior a 100 milissegundos.

Uma vez que a propagação de ondas se constitui no aspecto mais importante deste tipo de fenômeno, a modelagem da rede elétrica tem um efeito predominante no estudo. Não há tempo suficiente para que ocorram reações eletromagnéticas nas máquinas e nem há efeitos acentuados devido a saturação de componentes.

Considerando que a utilização de fontes de tensão constante atrás de equivalentes de rede (obtidos de programas de cálculo de curto circuito) tem como atrativo básico a sua simplicidade, a preocupação fundamental é com a extensão física da rede a ser modelada. É importante que as reflexões nas extremidades das redes não influenciem nos resultados do estudo (quando as reflexões voltam ao ponto de interesse o valor máximo já ocorreu).

Uma outra possibilidade mais elaborada consistiria na utilização de equivalentes de rede obtidos através de programas especiais para síntese de redes. Neste caso a extensão da rede a ser modelada não teria nenhuma importância e os esforços de modelagem seriam dispendidos na obtenção dos equivalentes de rede para estudos de transitórios. O modelo de fonte de tensão constante seria, então, plenamente satisfatório, uma vez que não haveria simplificações na representação da rede.

O modelo de fonte de tensão constante poderia, então, ser utilizado adequadamente em situações distintas quanto aos equivalentes de rede, não sendo um fator limitante quando o fenômeno transitório em análise tem forte amortecimento (curta duração). A reatância atrás da fonte de tensão é que refletiria o grau de simplificação na realização do estudo.

A tensão e a frequência da fonte equivalente de tensão permanecem fixos no sentido de que não há variações nos valores durante o período da simulação (barra infinita). A Figura 3 mostra uma fonte de tensão constante.

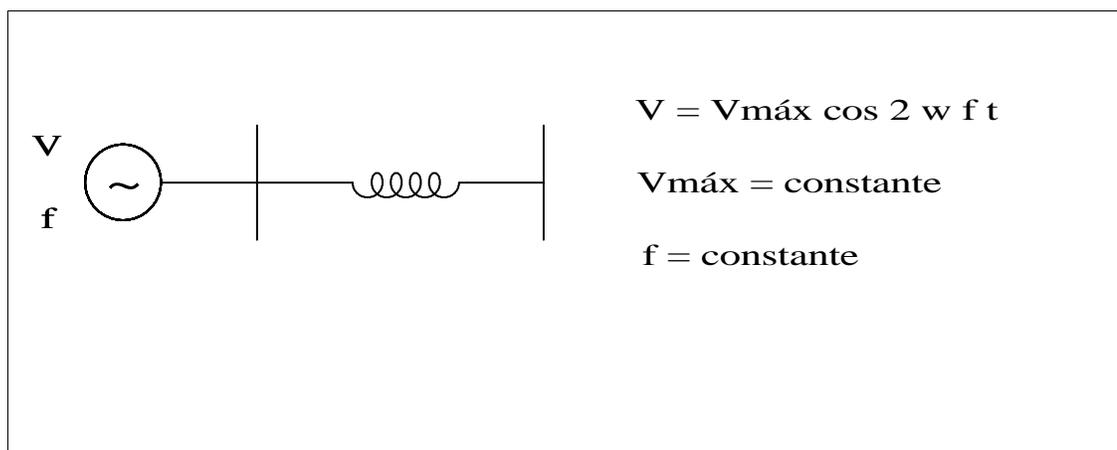


Figura 3 - Modelo de Fonte de Tensão Constante

3.2 Modelo de Fonte de Tensão Variável

O modelo de fonte de tensão variável deve ser utilizado quando o período de simulação é da ordem de centenas de milissegundos e a tensão e a frequência nos terminais da máquina síncrona apresenta variações significativas para a manobra que se está investigando.

Geralmente as máquinas síncronas apresentam variações de tensão e frequência em seus terminais após decorridos 300 a 400 milissegundos a contar do instante em que ocorreu a manobra ou falta na rede elétrica.

As variações de tensão e frequência nos terminais das máquinas síncronas devem ser obtidas de estudos de dinâmica e inseridas na simulação transitória através de um modelo conveniente para tal finalidade.

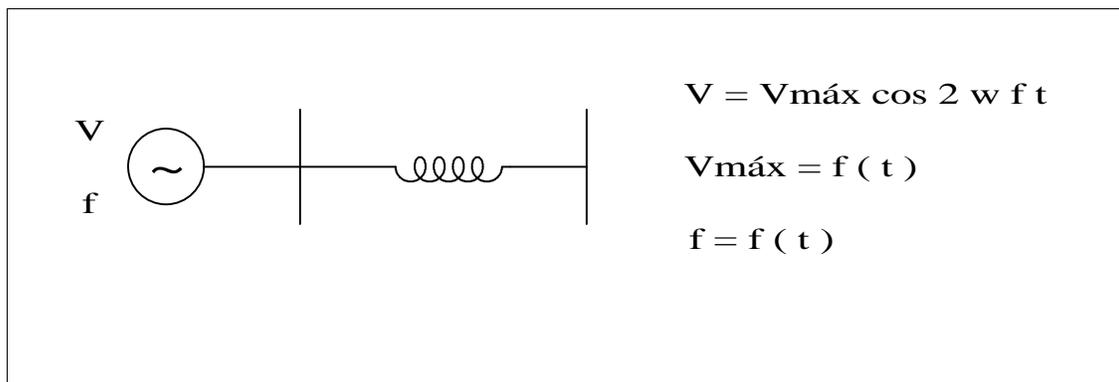


Figura 3 - Modelo de Fonte de Tensão Variável

O modelo de fonte de tensão variável incorpora o comportamento das máquinas síncronas durante as oscilações eletromecânicas (dos estudos de dinâmica) na simulação transitória eletromagnética. Com esta técnica é possível verificar as solicitações nos equipamentos incluindo numa única simulação a saturação de transformadores, os efeitos de propagação de ondas e a influência da operação de pára-raios.

O modelo de fonte de tensão variável é introduzido no ATP pela TACS (Transient Analysis of Control Systems), a qual permite incluir a variação da tensão e da frequência a cada intervalo de integração.

3.3 Representação Completa da Máquina Síncrona

A representação completa da máquina síncrona é usualmente aplicável a estudos de dinâmica ou a estudos de transitórios eletromagnéticos onde condições muito específicas tem que ser analisadas, como no caso de esforços torsionais em eixos de geradores, por exemplo.

Geralmente a sua utilização em estudos de transitórios eletromagnéticos é limitada por causa da complexidade inerente ao modelo e por causa do grande tempo de processamento que seria necessário para simulações da ordem de 1 segundo, por exemplo. De uma forma geral, pode-se afirmar que a

utilização da modelagem completa da máquina síncrona em estudos de transitórios eletromagnéticos estaria associada à utilização de uma ferramenta que não foi desenvolvida para esta finalidade específica.

4. Apresentação de Exemplos de Simulação no ATP

Com a finalidade de ilustrar a comparação envolvendo os diferentes modelos de fontes de excitação alguns casos muito específicos, deve ser ressaltado, foram selecionados.

O primeiro é associado com uma manobra de rejeição de carga no Sistema de 765 kV de Itaipu e o segundo é um caso de isolação forçada na Estação Inversora de Ibiúna. Nas duas situações um sistema radial permanece conectado a uma ou mais máquinas elétricas, enfatizando a sua influência nas condições da rede elétrica.

4.1 Rejeição de Carga no Sistema de Itaipu

A configuração do sistema elétrico para as simulações está indicada na Figura 5.

O caso de rejeição de carga para o Sistema de Itaipu pode ser decisivo para a especificação dos equipamentos do sistema. Para esta situação a atuação dos pára-raios é muito importante para o controle das sobretensões. O amortecimento do sistema é baixo e a duração das sobretensões pode chegar a 300 ou 400 milissegundos. Por causa desta situação foi decidido investigar a modelagem das máquinas síncronas para verificar a sua influência nas sobretensões resultantes.

Foi realizada uma comparação entre dois modelos: fonte de tensão variável com o tempo e modelo completo, incluindo ou não o regulador de tensão.

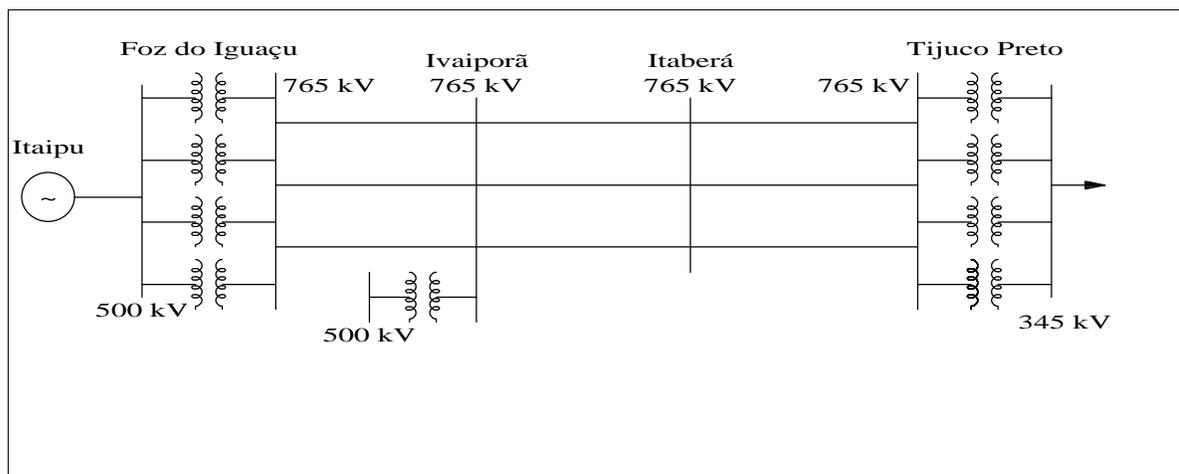


Figura 5 - Sistema de 765 kV de Itaipu Considerado para o Caso de Rejeição de Carga

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos para as correntes de condução e para as energias absorvidas nos pára-raios, considerando 9 máquinas em Itaipu e rejeição total da carga em Tijuco Preto 345 kV.

Tabela 1 - Sobretensões, Energias e Correntes de Condução nos Pára-raios

Caso	Sobretensões (pu)	Energia (MJ)	Corrente (A)
3	1.687	1.615	459
4	1.686	1.555	444

A diferença entre os casos 3 e 4 está na modelagem das máquinas. No caso 3 a máquina equivalente foi modelada com a representação completa, incluindo regulador de tensão e no caso 4 com fonte de tensão variável. Um caso considerando-se a máquina representada com fonte de tensão constante não apresentou variações significativas nos valores mostrados na Tabela 1 (respectivamente 1.681 pu, 1.57 MJ e 437 A) porque as maiores solicitações aconteceram justamente nos dois primeiros ciclos. É importante ressaltar que os resultados da Tabela 1 foram obtidos para um caso processado até 200 milissegundos, somente.

O caso 4 (modelo de máquina completo) foi novamente processado, alterando-se o tempo máximo de estudo para 500 milissegundos, sendo os resultados apresentados na Figura 6. O tempo de processamento foi estendido para facilitar a visualização de possíveis diferenças na faixa de interesse (300 a 500 milissegundos).

O caso 4 (modelo de máquina completo) foi modificado, retirando-se o regulador de tensão (o modelo da máquina ficou somente com a parte elétrica representada, somente as equações de Park, sem regulador de tensão). Na Figura 7, onde os resultados são apresentados, pode ser observado que há uma tendência para valores de tensão mais elevados para tempos acima de 200 ms, mostrando que o regulador de tensão está atuando para tentar controlar a tensão terminal das máquinas.

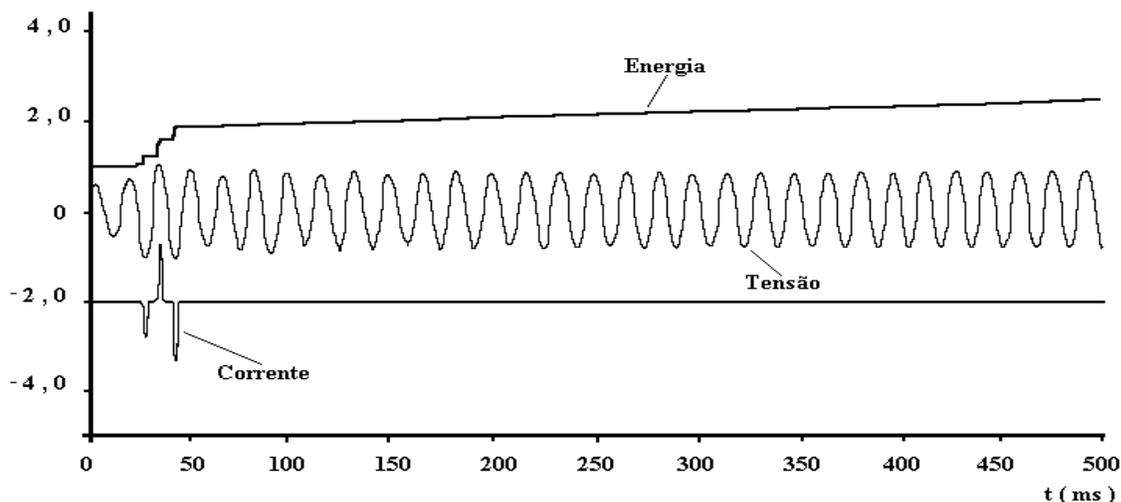


Figura 6 - Sobretensão, Energia e Corrente de Condução nos Pára-raios para Modelo Completo da Máquina

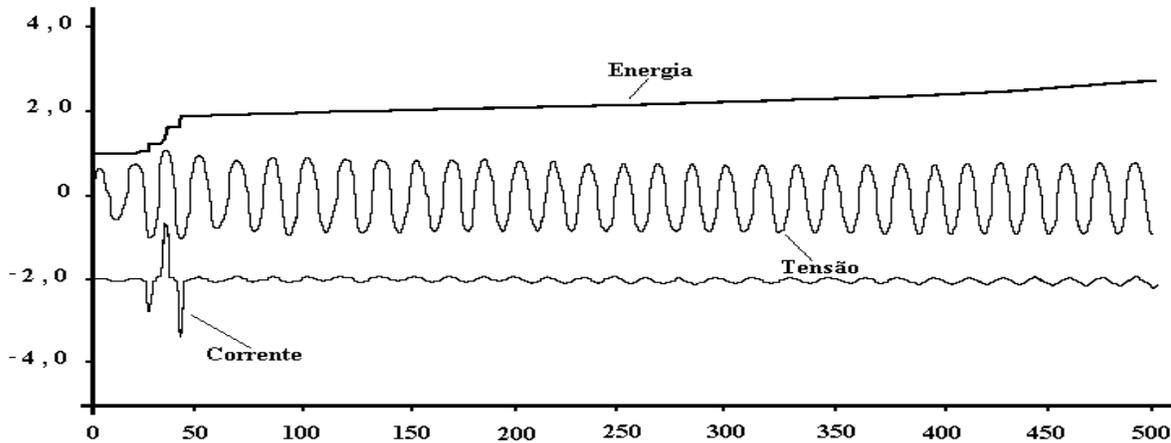


Figura 7 - Sobretensão, Energia e Corrente de Condução nos Pára-raios para Modelo Completo da Máquina, sem Regulador de Tensão

Dos resultados apresentados acima pode-se concluir que o modelo de fonte de tensão variável é suficientemente preciso para estudos de transitórios eletromagnéticos. Esta conclusão é plenamente válida para os casos onde as máquinas síncronas conseguem manter a regulação de tensão nos seus terminais. Uma vez que a variação de frequência e tensão é obtida de estudos de dinâmica, a sua precisão será tanto maior quanto menor for a influência dos elementos saturáveis durante a manobra que está sendo estudada.

A representação completa da máquina síncrona não se mostrou necessária para a configuração examinada, sendo a diferença nos resultados insuficiente para justificar o esforço dispendido na modelagem.

4.2 Isolação Forçada

Na estação inversora do Sistema de Corrente Contínua de Itaipu foi detectada uma situação onde os compensadores síncronos poderiam permanecer conectados aos filtros CA. Para esta situação há um grande risco de auto-excitação para as máquinas, dependendo da quantidade de filtros e compensadores síncronos que permanecerem conectados.

No decorrer dos estudos foi observado que a modelagem dos compensadores síncronos poderia ter uma influência acentuada no comportamento das sobretensões transitórias. O modelo de fonte de tensão constante estava mascarando o fenômeno de auto-excitação nos compensadores síncronos, apesar dos altos valores das sobretensões.

O modelo completo de máquina, porém sem regulador de tensão, foi incluído na simulação e os resultados obtidos nos estudos na frequência fundamental foram confirmados. As solicitações nos equipamentos foram determinadas e uma solução foi implementada, para permitir a abertura dos disjuntores das linhas de transmissão e dos filtros sem risco para os equipamentos.

A Figura 8 apresenta o diagrama do circuito correspondente ao caso em estudo.

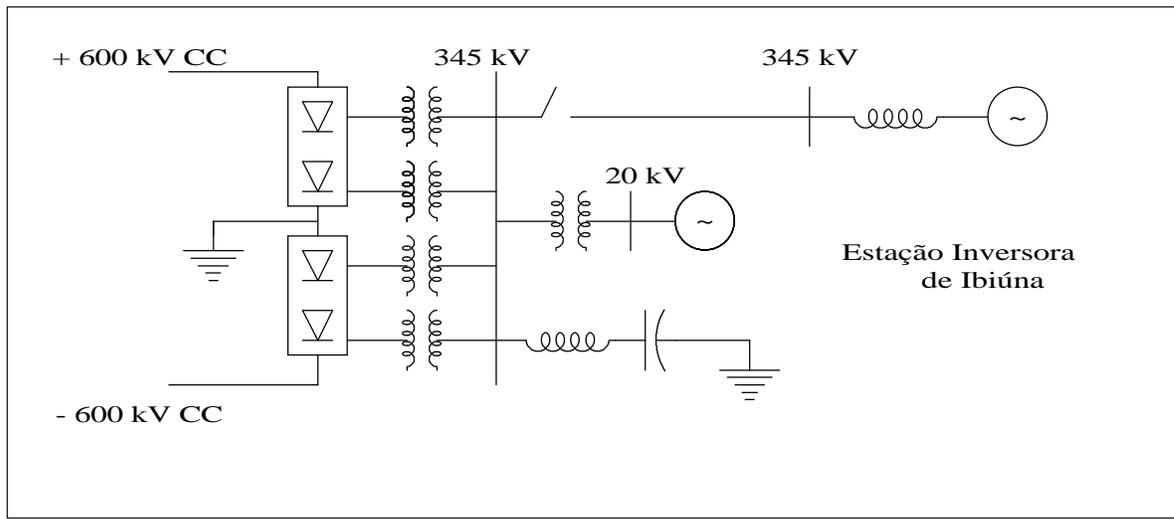


Figura 8 - Configuração da Rede Elétrica para o Estudo de Isolação Forçada

O estudo consistia basicamente em abrir o disjuntor da linha de transmissão de 345 kV, com o sistema CC já bloqueado, para verificar a sobretensão no sistema restante (basicamente compensador e filtros e transformadores conversores). A abertura dos filtros só poderia ser realizada caso as sobretensões não ultrapassassem o valor máximo especificado para o disjuntor.

A sobretensão resultante para um caso considerando modelo de fonte de tensão constante para os compensadores síncronos, e sem elementos saturáveis, está indicada na Figura 9.

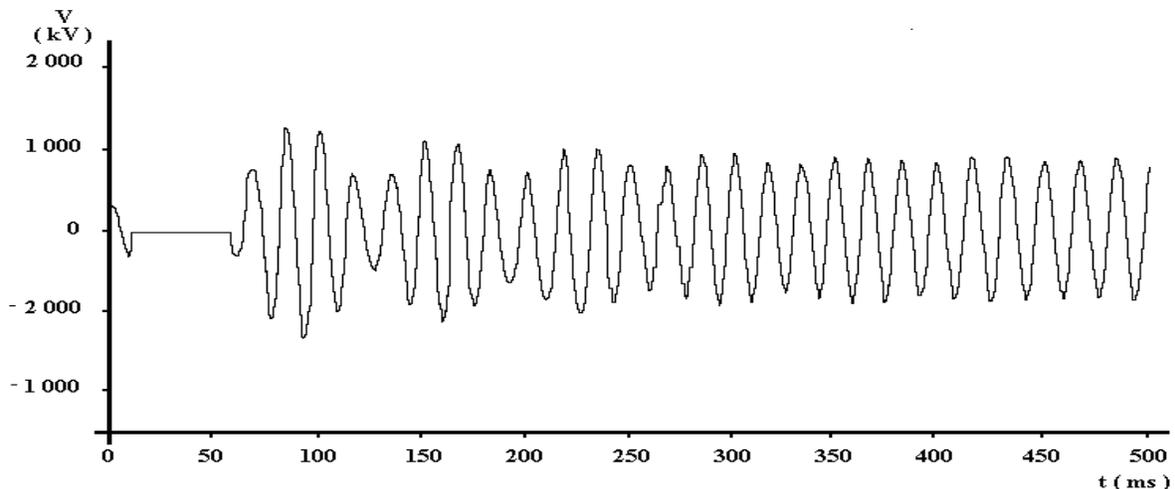


Figura 9 - Sobretensão no 345 kV Considerando Modelo de Fonte de Tensão Constante

A sobretensão resultante para um caso considerando modelo completo para os compensadores síncronos, e sem elementos saturáveis, está indicada na Figura 10.

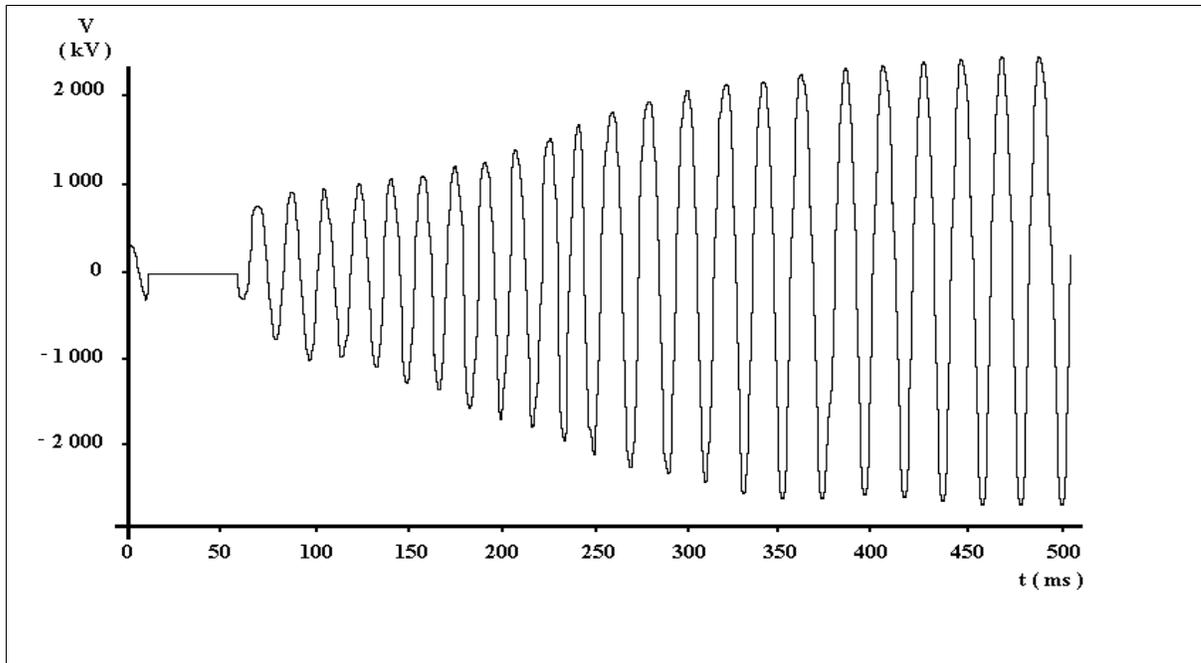


Figura 10 - Sobretensão no 345 kV Considerando Modelo Completo de Máquina

A sobretensão resultante para um caso considerando modelo completo para os compensadores síncronos, saturação nos transformadores e pára-raios está indicada na Figura 11.

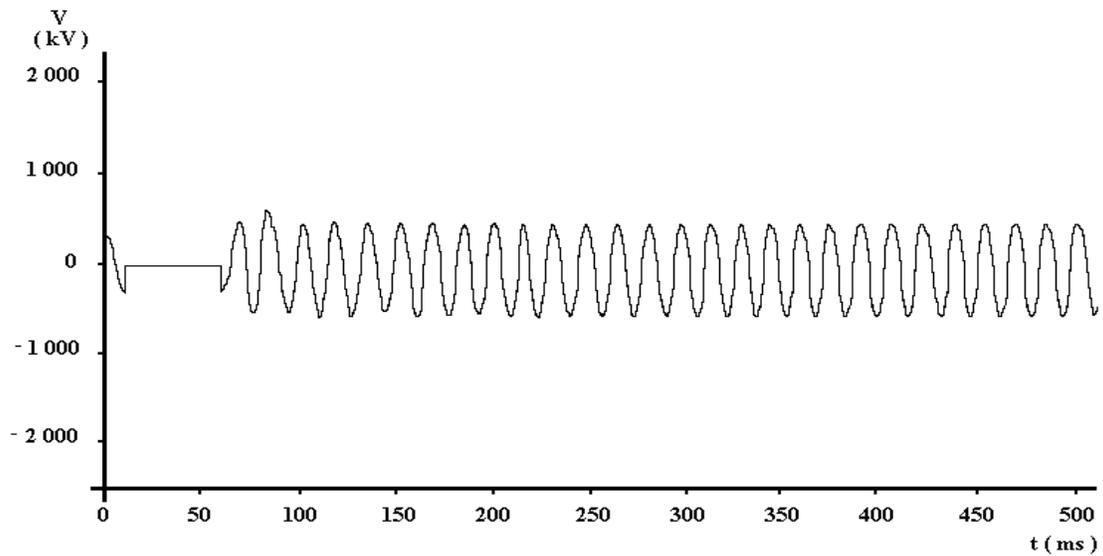


Figura 10 - Sobretensão no 345 kV Considerando Modelo Completo de Máquina e Não Linearidades

5. Conclusões

As solicitações de tensão nos equipamentos de um sistema elétrico que podem ser submetidos a sobretensões transitórias de longa duração devem ser determinadas através do uso de um programa digital de transitórios eletromagnéticos, uma vez que os estudos na frequência fundamental não levam em consideração as não linearidades dos componentes da rede elétrica.

Cuidados especiais devem ser tomados na modelagem das máquinas síncronas. Determinados tipos de fenômenos podem ser mascarados em situações muito particulares. Por exemplo, auto excitação em máquinas podem não aparecer caso o modelo da máquina não seja adequado.

O modelo de fonte de tensão variável incorpora o comportamento das máquinas síncronas (obtido nos estudos de frequência fundamental) aos estudos de transitórios eletromagnéticos. A sua utilização deve ser implementada nos casos onde as sobretensões não tem grande amortecimento.

O modelo completo de máquinas síncronas (sem regulador de tensão) é necessário para o estudo de ressonância sub-síncrona, sincronização fora de fase, esforços torsionais em eixos de geradores, auto-excitação, etc... Em alguns casos a representação dos reguladores de tensão pode ser necessário.

Bibliografia

1. R. A. A. Gonçalves - Nota Técnica de Furnas Nº DSE.T.003.89, Estudo de Rejeição de Carga para o Sistema de 765 kV CA de Itaipu, Janeiro de 1989.
2. ASEA-PROMON HVDC Consortium - Relatório Técnico AP 133, Equipment Stresses at Isolation of the Converter Station at Ibiuna, Dezembro de 1982.

Capítulo XII

Modelagem de Pára-raios de ZnO em Estudos de Sobretensões

1. Generalidades

As redes elétricas podem sofrer diversas formas de transitórios elétricos, associados a variações súbitas de tensão e corrente, provocados por descargas atmosféricas, faltas no sistema ou operação de disjuntores. Estes transitórios elétricos podem gerar solicitações de diversas origens nos equipamentos que compõem o sistema elétrico, sendo necessário a realização de simulações para determinar as suas características, basicamente as intensidades e as durações.

Com o conhecimento das solicitações elétricas é possível a realização dos estudos de coordenação de isolamento, os quais tem por finalidade básica a definição dos níveis de isolamento dos equipamentos.

Os estudos de coordenação de isolamento dependem basicamente das características dos dispositivos de proteção utilizados nas instalações elétricas, constituídos praticamente de pára-raios de ZnO nas novas instalações.

Com o advento dos pára-raios de ZnO, as possibilidades técnicas para a redução do nível de isolamento dos equipamentos são maiores, o que tem levado a um esforço crescente no sentido de se realizarem estudos de transitórios cada vez mais precisos para atender a esta finalidade.

Para alcançar este objetivo é necessário um maior desenvolvimento das técnicas de simulação e melhorar o conhecimento das características dos equipamentos do sistema, em particular, as características de proteção dos pára-raios, as quais ainda estão sujeitas a variações pelo fato de se tratar de um produto em constante desenvolvimento.

Nos próximos itens serão abordados alguns aspectos relacionados com a modelagem de pára-raios de ZnO em estudos de sobretensões de manobra e em estudos de coordenação de isolamento para injeção de surtos em subestações.

2. Modelagem de Pára-raios de ZnO em estudos de Sobretensões de Manobra

2.1. Introdução

Pára-raios de ZnO são dispositivos de proteção contra sobretensões muito conhecidos atualmente e que não necessitam de centelhadores de nenhuma espécie por causa de suas características não-lineares muito acentuadas.

Os pára-raios de ZnO apresentam algumas vantagens com relação aos pára-raios convencionais, mas alguns cuidados devem ser observados para a definição das características necessárias para a sua simulação nos estudos de sobretensões.

As energias absorvidas pelos pára-raios de ZnO dependem das suas próprias características de proteção e da configuração elétrica da rede sendo estudada. Geralmente a energia absorvida pelos pára-raios é maior nos sistemas com menores impedâncias de surto e para características de proteção mais baixas.

Na ocorrência de sobretensões de manobra todos os pára-raios de uma subestação conduzem simultaneamente, dividindo a energia total gerada pelo surto.

Devido a possíveis diferenças nas características dos pára-raios em paralelo, a divisão de energia não é uniforme e o pára-raios com a característica mais baixa é o que vai absorver mais energia que os outros. Mesmo pequenas diferenças nas características podem provocar grandes diferenças na absorção de energia.

2.2. Características de Proteção dos Pára-raios de ZnO

2.2.1 Níveis de Proteção

Os níveis de proteção dos pára-raios de ZnO, sem centelhadores de qualquer espécie, são definidos somente pela tensão residual que aparece através de seus terminais.

É muito importante observar que o fabricante indica a máxima e a mínima tensão residual para cada corrente de condução. A diferença entre a característica máxima e a característica mínima é usualmente na faixa de 5 %. Os fabricantes afirmam que a diferença nas características dos pára-raios é sempre muito pequena e que é inerente ao processo de fabricação. A faixa de 5 % se aplica a pára-raios fabricados ao longo de um determinado período de tempo e deve ser interpretada como sendo uma faixa máxima permitida. Para uma determinada "fornada" a característica é praticamente uniforme e deve estar situada dentro das duas características extremas (característica máxima e mínima).

A tensão residual pode também ser modificada pelo fabricante para atender objetivos específicos de uma determinada aplicação.

A tensão residual depende da forma e da magnitude da corrente de condução, devendo ser obtida dos fabricantes, tal como indicado na Figura 1.

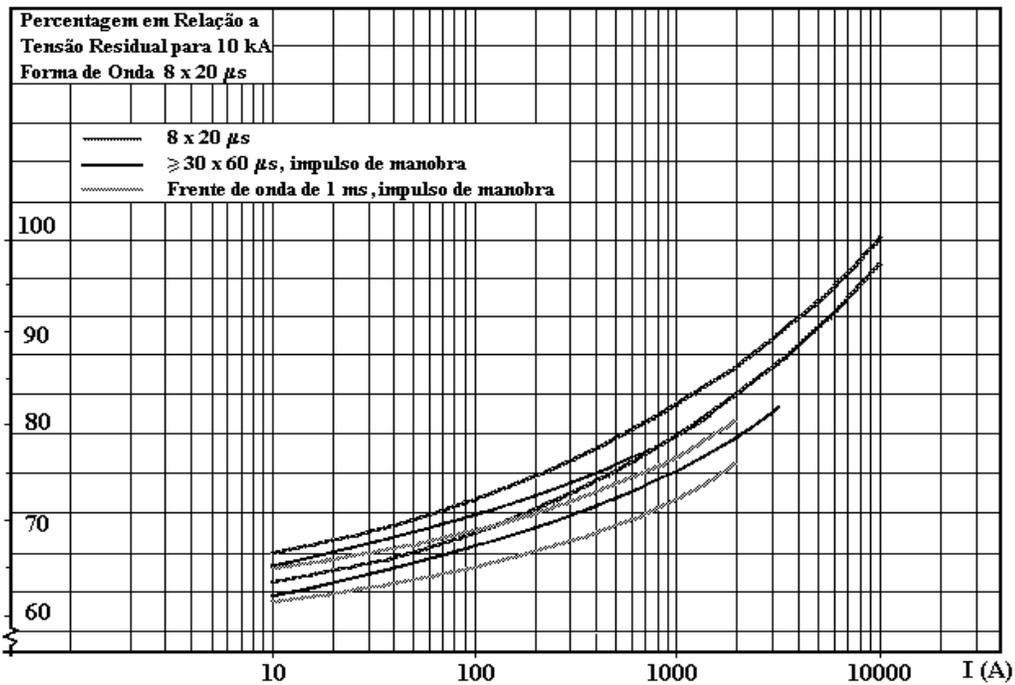


Figura 1 - Tensão Residual para Diferentes Formas de Onda

2.2.2 Capacidade de Absorção de Energia

Os pára-raios de ZnO são mais sujeitos a períodos de condução longos do que os pára-raios convencionais devido a ausência de centelhadores.

A capacidade de absorção de energia deve ser corretamente dimensionada de forma a evitar problemas na operação dos equipamentos do sistema, inclusive nos próprios pára-raios, por ocasião de sobretensões.

Pode ser demonstrado que a relação entre a energia absorvida por um pára-raios de ZnO e o seu nível de proteção tem a forma indicada na Figura 2.

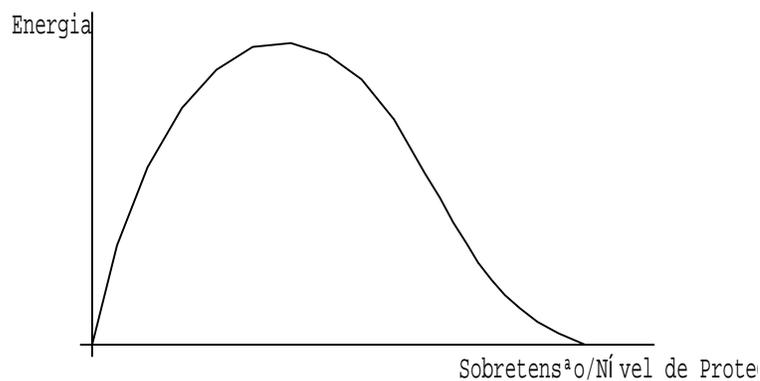


Figura 2 - Relação entre o Nível de Proteção e a Energia Absorvida num Pára-raios de ZnO

É fácil compreender que a energia é muito pequena para nível de proteção pequeno e quando a sobretensão é igual ao nível de proteção. Como a energia é a integral do produto da tensão pela corrente, no primeiro caso a tensão sendo muito pequena impede que o produto seja grande e no segundo caso o nível de proteção muito alto (ou sobretensão muito baixa) impede que a corrente seja alta.

A energia aumenta com o aumento do nível de proteção até um ponto onde um valor máximo é encontrado e depois a energia volta a diminuir a medida que o nível de proteção continua aumentando.

Geralmente os pára-raios de ZnO são aplicados na região onde a energia absorvida aumenta com a diminuição do nível de proteção porque a tensão nominal do pára-raios está relacionada com a tensão operativa do sistema e, conseqüentemente, o nível de proteção.

Há situações onde a tensão de operação do sistema não é fundamental na definição da tensão nominal do pára-raios, como nos casos dos pára-raios de filtros e de neutro de equipamentos. Nestes casos a energia geralmente aumenta com o aumento do nível de proteção do pára-raios.

De uma forma geral pode ser afirmado que, nas instalações usuais, é necessário modelar o pára-raios com a característica mínima fornecida pelo fabricante para surtos de manobra, uma vez que a energia absorvida correspondente será maximizada e o equipamento poderá suportar as solicitações do sistema sem risco de alguma condição excepcional decorrente da consideração de uma característica inadequada.

2.3. Modelagem de Pára -raios de ZnO

2.3.1 Modelos Existentes no ATP

Existem algumas possibilidades distintas para a modelagem de pára-raios de ZnO no ATP, basicamente associadas a modelagem de resistências não-lineares e divididas em dois grupos básicos: modelagem através de pares de pontos de tensão e corrente e modelagem através de equações que definem a característica não-linear.

Um caso muito simples foi examinado com o objetivo de testar os diferentes modelos do ATP, com exceção do modelo que utiliza equações para definir a característica não-linear. Dos resultados apresentados na Tabela 1 pode ser observado que todos os modelos tem um desempenho consistente e que as diferenças não são significativas.

Tabela 1 - Comparação entre Diferentes Modelos do ATP

Modelo	Tensão (kV)	Corrente (A)	Energia (kJ)
Tipo 99	548	9 940	1 375
Tipo 92 (4444.)	548	9 895	1 372
Tipo 92 (5555.)	548	9 978	1 362

2.3.2 Casos com Vários Pára-raios de ZnO em Paralelo

Nos estudos de sobretensões de manobra, onde a energia absorvida nos pára-raios é um dos parâmetros mais importantes para a seleção dos próprios pára-raios, é fundamental que os pára-raios sejam corretamente modelados.

Nos itens anteriores foi informado que a modelagem de um pára-raios deve ser baseada em sua característica mínima. Nos casos de vários pára-raios em paralelo é razoável considerar que nem todos os pára-raios tem exatamente a mesma característica.

Com o objetivo de ilustrar as diferentes possibilidades com relação a modelagem de pára-raios de ZnO dois casos foram simulados no ATP : o primeiro é um caso de re-ignição de um disjuntor durante a abertura de um banco de capacitores e o segundo é um caso de rejeição de carga.

Para a primeira situação, que é a re-ignição de um banco de capacitores, cinco condições diferentes para as características dos pára-raios foram consideradas. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos para cada uma das diferentes simulações, devendo ser ressaltado que há somente dois pára-raios conectados por fase.

Tabela 2 - Correntes de Condução e Energia Absorvida no Caso de Re-ignição

Número do Caso	Energia (kJ)		Corrente (A)	
	Pára-raios 1	Pára-raios 2	Pára-raios 1	Pára-raios 2
1	685	685	5030	5030
2	435	1000	3650	7180
3	740	740	6015	6015
4	1310	-----	12515	-----
5	1410	-----	16700	-----

As características dos pára-raios 1 e 2 foram modeladas da forma indicada na Tabela 3.

Tabela 3 - Modelagem dos Pára-raios no Caso de Re-ignição

Caso	Pára-raios 1	Pára-raios 2
1	característica máxima	característica máxima
2	característica máxima	característica mínima
3	característica mínima	característica mínima
4	característica máxima	-----
5	característica mínima	-----

Dos resultados apresentados na Tabela 2 pode ser observado que uma grande variação na energia absorvida nos pára-raios é obtida para os diferentes modelos utilizados nas simulações.

É evidente que há necessidade de incluir na simulação os dois pára-raios em separado, uma vez que os resultados obtidos com um único pára-raios são inferiores ao total obtido com dois pára-raios e muito superiores aos valores individuais de cada pára-raios. A simulação de um único pára-raios, considerando o outro desconectado, é desprovida de fundamento e não deve ser realizada.

Considerando que as características dos dois pára-raios podem ser diferentes por várias razões (tolerância máxima permitida na especificação, aquisição em épocas diferentes, diferentes fabricantes, etc...), a forma mais conservativa é considerar um pára-raios na característica máxima e outro na mínima, tal como mostrado no caso 2 da Tabela 2. Nestas condições um pára-raios poderia absorver 1000 kJ, valor este que deveria ser considerado para a sua especificação.

A Tabela 4 apresenta os resultados para o caso de rejeição de carga, onde há 5 pára-raios conectados na mesma subestação onde o sistema foi desconectado.

Tabela 4 - Corrente de Condução e Energia Absorvida no Caso de Rejeição de Carga

Número do Caso	Energia (kJ)		Corrente (A)	
	Pára-raios 1	Pára-raios 2	Pára-raios 1	Pára-raios 2
1	5 x 1080	-----	5 x 135	-----
2	5 x 1330	-----	5 x 150	-----
3	1 x 2245	4 x 870	1 x 255	4 x 105
4	1 x 3235	-----	1 x 435	-----
5	1 x 4460	-----	1 x 525	-----

Na tabela 6 estão indicadas as modelagens utilizadas para os 5 pára-raios.

Tabela 6 - Modelagem dos Pára-raios no Caso de Rejeição de Carga

Caso	Pára-raios 1	Pára-raios 2
1	5 x característica máxima	-----
2	5 x característica mínima	-----
3	1 x característica mínima	4 x característica máxima
4	1 x característica máxima	-----
5	1 x característica mínima	-----

Nos 3 primeiros casos da Tabela 6 os cinco pára-raios foram simulados, tal como explicado a seguir, e nos dois últimos casos apenas um pára-raios foi considerado.

No caso 1 os 5 pára-raios foram substituídos por um único pára-raios correspondente ao paralelismo de todos os 5 na característica máxima. No caso 2 a situação é idêntica, mas a característica considerada foi a mínima. No caso 3 um pára-raios foi modelado na característica mínima e os outros 4 foram

paralelados na característica máxima. No caso 4 o único pára-raios foi modelado na característica máxima e no caso 5 o único pára-raios foi modelado na característica mínima.

Da mesma forma que no caso anterior de re-ignição de disjuntor pode ser observado que há necessidade de se modelar todos os pára-raios submetidos ao mesmo surto de manobra e que a forma mais conservativa é considerar um dos pára-raios na característica mínima e os restantes na característica máxima (modelados por um equivalente de 4 pára-raios).

Deve ser observado que a diferença entre a energia absorvida é substancialmente aumentada quando o número de pára-raios é maior. Entretanto, com uma quantidade de pára-raios grande é razoável supor que a combinação mais conservativa (um na característica mínima e todos os restantes na característica máxima) não tem uma probabilidade grande de ocorrer e uma combinação intermediária poderia ser adotada.

2.3.3 Pára-raios com Colunas em Paralelo

Quando a quantidade de energia absorvida pelo pára-raios em determinada condição do sistema é maior do que aquela indicada pelo fabricante é necessário utilizar pára-raios de múltiplas colunas.

Nos pára-raios de múltiplas colunas a característica não linear é o resultado do paralelismo de todas elas. Caso o número de blocos em série seja mantido em todas as colunas a característica resultante é sempre menor.

Nas simulações é sempre necessário que haja uma correspondência entre o número de colunas e a capacidade de absorção de energia do conjunto. Em caso contrário a simulação deve ser refeita porque há uma interação entre a característica não linear do pára-raios e o sistema elétrico. A energia absorvida aumenta quando a característica não linear diminui e os casos tem que ser repetidos até que a energia seja compatível com a quantidade de colunas.

Uma alternativa é manter a característica fixa e considerar a quantidade de colunas necessária para suportar a energia absorvida. Isto, na prática, significa aumentar a quantidade de pastilhas em série em cada coluna para compensar a diminuição da característica que haveria em função do aumento da quantidade de colunas. Para uma grande quantidade de colunas este procedimento pode não ser econômico.

2.4. Conclusões

⇒ A característica não linear de um pára-raios ZnO não pode ser considerada 100 % conhecida, a menos que sejam efetuados testes de laboratório. O processo de fabricação implica numa dispersão da ordem de 5 %. Em estudos de planejamento não é possível trabalhar sem considerar a dispersão na característica não linear do pára-raios ZnO. A utilização de fabricantes diferentes agrava ainda mais a dispersão entre as características dos pára-raios.

⇒ As solicitações de energia são muito influenciadas pelas características não lineares consideradas na modelagem dos pára-raios ZnO.

⇒ A determinação da capacidade de energia de um pára-raios de ZnO implica no conhecimento da correta quantidade de colunas. Para esta finalidade é necessário conhecer a capacidade de absorção de cada coluna e a dispersão máxima entre colunas paralelas.

⇒ No caso de vários pára-raios instalados no mesmo local é necessário considerar modelos que levem em conta a quantidade de pára-raios e as características não lineares convenientes.

⇒ Um procedimento conservativo implica em modelar um pára-raios em sua característica mínima e os outros em sua característica máxima.

3. Modelagem de Pára-raios de ZnO em Estudos de Coordenação de Isolamento

3.1 Introdução

Diversos trabalhos tem sido elaborados na área de coordenação de isolamento buscando sofisticar os processos atualmente sendo utilizados. De particular interesse com relação aos estudos de injeção de surtos em subestações, são as informações pertinentes às características dos pára-raios de ZnO e o modelo de pára-raios para surtos de tensão com frentes de onda na faixa de 0,5 a 10 μ s , tal como apresentado na referência 7.

A preocupação com relação aos surtos atmosféricos com frentes de onda muito curtas (da ordem de 1 μ s) está relacionada com taxas de crescimento das descargas atmosféricas subseqüentes, com a possibilidade de falhas de blindagem nos primeiros vãos e com a ocorrência de ruptura do isolamento da linha nas proximidades da subestação, o que provocaria um surto de tensão com taxa de crescimento muito elevado penetrando na subestação.

3.2 Sobreensões Atmosféricas

As sobreensões atmosféricas são provocadas pela incidência de raios nas linhas de transmissão, sendo de grande importância para os estudos de coordenação de isolamento em virtude das altas taxas de crescimento que podem alcançar e das elevadas solicitações que provocam nos terminais dos equipamentos.

Os tempos de crista dos surtos de tensão que alcançam a subestação dependem das características das descargas atmosféricas, da distância percorrida até a subestação e da suportabilidade do isolamento da linha de transmissão.

Os mecanismos de incidência de raios sobre uma linha de transmissão são a falha de blindagem e a queda de raios nas torres ou nos cabos pára-raios. No primeiro caso a incidência é no cabo condutor e a taxa de crescimento está diretamente relacionada com as características da descarga atmosférica e da distância entre o ponto de incidência e a subestação. No segundo caso a transferência do surto para o cabo condutor depende da ocorrência da ruptura do isolamento da linha de transmissão e, neste caso, a taxa

de crescimento está associada à distância entre a subestação e a cadeia de isoladores onde houve a falha de isolamento, uma vez que a elevação de tensão se processa abruptamente, como indicado na Figura 3, para um caso teórico.

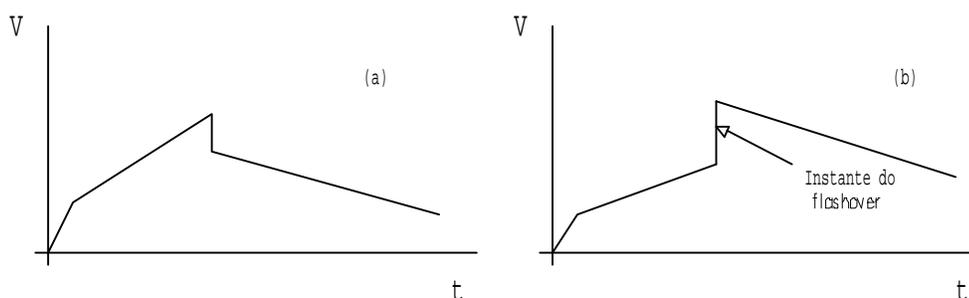


Figura 3 - Tensões Geradas por uma Descarga Atmosférica: (a) nas torres e nos Cabos Pára-raios e (b) no Cabo Condutor

3.3 Efeito-Distância

Quando se realiza um estudo de coordenação de isolamento de uma subestação, a tensão máxima que aparece nos terminais dos equipamentos é função da natureza da solicitação, da localização dos pára-raios, das características dos equipamentos e dos comprimentos dos barramentos da instalação.

O efeito-distância é a amplificação da tensão no terminal do equipamento em relação ao nível de proteção do pára-raios. É proveniente da propagação da onda de surto que, apesar de limitada pelo pára-raios, continua sofrendo reflexões em todos os pontos de discontinuidades. Sendo um fenômeno de propagação de ondas, a sua importância só existe para ondas do tipo surto atmosférico por causa das pequenas distâncias dentro de uma subestação e das altas taxas de crescimento envolvidas. Quanto menor a frente de onda do surto, ou maior o comprimento do barramento, maiores são as dificuldades para a proteção dos equipamentos porque a amplificação da tensão é maior.

3.4 . Representação dos Principais Componentes

A representação de uma subestação, para a simulação da injeção de surtos atmosféricos, é baseada na modelagem dos barramentos, devido ao efeito-distância, dos equipamentos, dos pára-raios e da linha de transmissão.

Os equipamentos são representados pelas suas capacitâncias terminais, de uma forma geral. Os transformadores reguladores, os filtros de ondas, os bancos de capacitores e as válvulas, os filtros e os reatores de alisamento de uma estação conversora, são equipamentos que devem ser representados pelos seus parâmetros apropriados, além das capacitâncias terminais.

A linha de transmissão é modelada somente pelo trecho próximo à subestação e a sua representação está diretamente relacionada com a modelagem do surto atmosférico e a sua origem.

3.5. Características dos Pára-raios de ZnO

A grande maioria dos pára-raios de ZnO é desprovida de centelhadores de qualquer espécie. A sua representação é simples e realizada através de sua característica de tensão residual. Nos estudos de injeção de surtos atmosféricos é necessária a utilização da curva tensão x corrente, obtida para impulsos de corrente de forma de onda $8 \times 20 \mu\text{s}$, corrigida ou não para frentes de onda mais curtas.

As informações relativas à variação da tensão residual com a frente de onda são mostradas na Figura 4, para pára-raios de ZnO de tensão nominal entre 54 e 360 kV, onde o eixo horizontal é o tempo de crista da tensão de descarga e o eixo vertical é a tensão residual em p.u. da tensão residual para 10 kA e $8 \times 20 \mu\text{s}$, extraídas da referência 6.

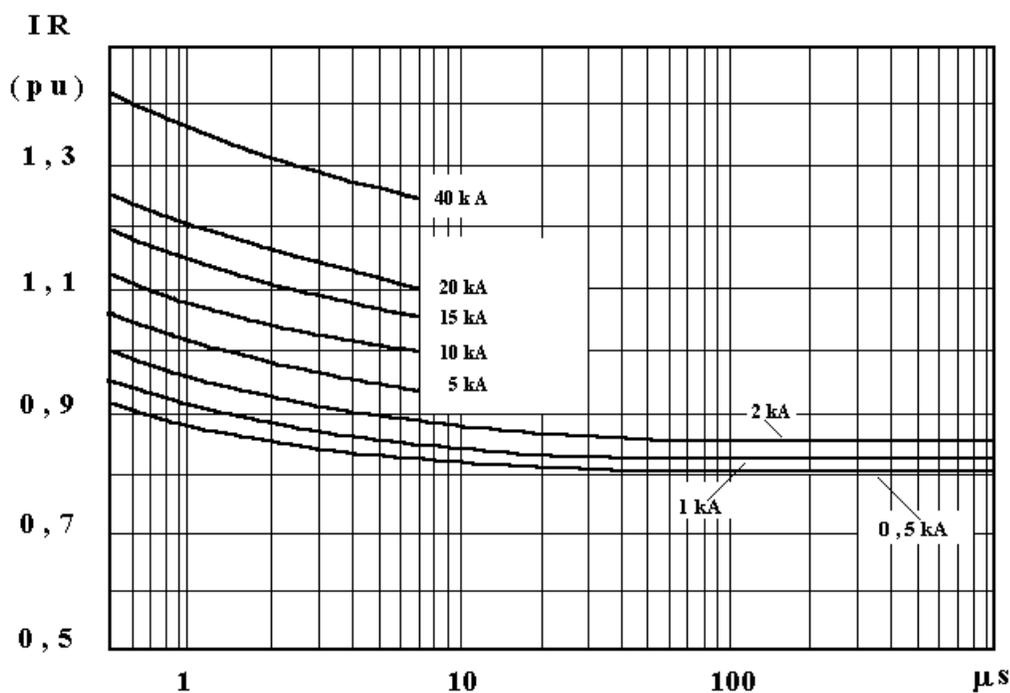


Figura 4 - Variação da Tensão Residual em Função do Tempo de Crista da Corrente de Impulso

Nos estudos de injeção de surtos em subestações, as características dos pára-raios devem ser corrigidas para as frentes de onda mais curtas, com base nas informações mostradas acima, que permitem a

correção da característica da tensão x corrente dos impulsos de corrente 8 x 20 μ s para frentes de onda mais curtas.

Uma alternativa conservativa é apresentada na referência 6, onde as curvas de tensão residual estão indicadas em p.u. para vários valores de intensidades de corrente e duas formas de onda do impulso de corrente. As características são apresentadas em seus valores máximos e mínimos e o fabricante sugere a

utilização da característica para frente de onda equivalente (tempo de crista de 0,5 μ s) nos estudos de surtos em subestações.

Tabela 1 - Características dos Pára-raios de ZnO para Surtos Atmosféricos

Corrente (A)	Tensão Residual (p.u.)			
	0,5 μ s		8 x 20 μ s	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
1	-----	-----	0,647	0,691
10	-----	-----	0,682	0,725
100	-----	-----	0,734	0,769
500	-----	-----	0,790	0,819
1000	0,927	0,958	0,820	0,847
2000	0,972	0,996	0,860	0,881
5000	1,044	1,070	0,923	0,946
10000	1,117	1,131	0,988	1,000
15000	1,167	1,200	1,032	1,061
20000	1,209	1,254	1,063	1,109
40000	1,318	1,414	1,166	1,251

3.6 . Modelagem de Pára-raios de ZnO

Os pára-raios de ZnO tem sido modelados nos estudos de injeção de surtos, com resultados satisfatórios, com base nas características apresentadas no item anterior. No entanto, como a característica da tensão residual não representa de forma precisa o comportamento real do ZnO, um novo modelo foi desenvolvido, como documentado na referência 7.

A Figura 5 apresenta as curvas de tensão residual e de corrente de condução para os casos teórico e real. No caso teórico, que é a característica normalmente utilizada, os valores máximos de tensão e de corrente são simultâneos e no caso real esta coincidência não existe.

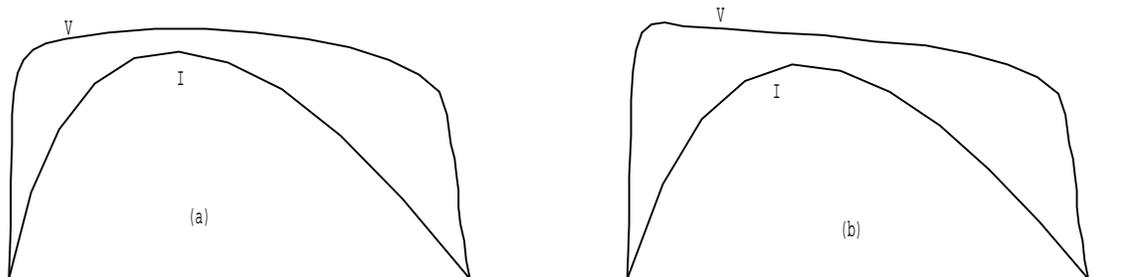


Figura 5 - Relação entre Tensão Residual e Corrente de Condução no ZnO : (a) Caso Teórico
(b) Caso Real

O desenvolvimento do modelo foi baseado em ensaios realizados em seções de ZnO formados por 2 discos em série de 3 polegadas de diâmetro. Foram aplicados impulsos de corrente com as seguintes formas de onda:

$$\Rightarrow 47 \times 86 \mu\text{s}$$

$$\Rightarrow 12 \times 23 \mu\text{s}$$

$$\Rightarrow 0,95 \times 1,60 \mu\text{s}$$

$$\Rightarrow 0,5 \times 0,85 \mu\text{s}$$

A Figura 6 apresenta a reprodução de dois oscilogramas típicos.

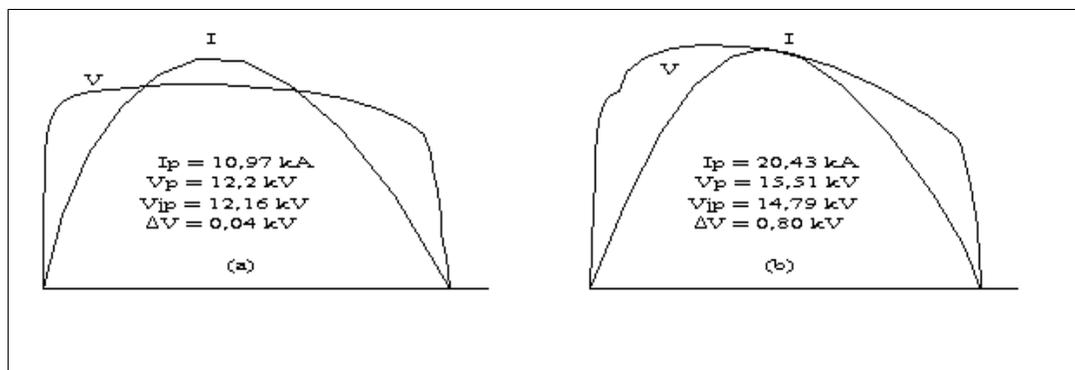


Figura 6 - Tensão Residual para Impulso de Corrente de 10 kA, 47 x 86 μs (a)
e 20 kA, 0,95 x 1,60 μs (b)

A Figura 7 mostra os valores de pico da tensão residual em função da corrente, para as diversas formas de onda consideradas nos ensaios. A dependência da tensão com relação à forma de onda é evidente, uma vez que as curvas para os impulsos mais rápidos estão mais altas do que para as curvas para os impulsos mais lentos. Para os impulsos mais lentos a dependência da tensão com a forma de onda é

muito pequena e o pico da tensão ocorre simultaneamente com o pico da corrente, como pode ser visto na Figura 6.

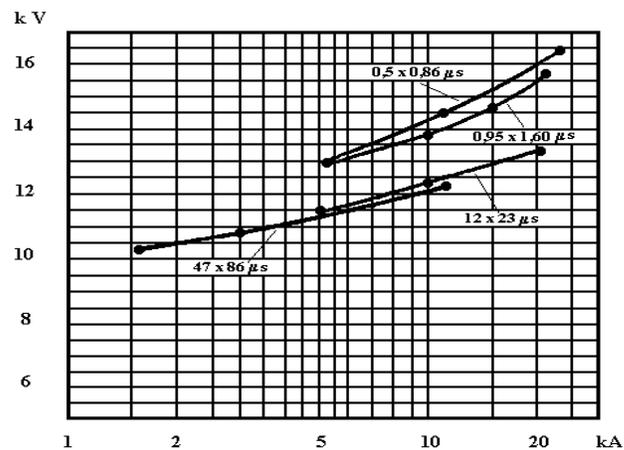


Figura 7 - Relação entre o Valor de Pico da Tensão Residual e o Impulso de Corrente

Os ensaios realizados não foram suficientes para explicar porque os discos de ZnO apresentam uma característica $V \times I$ de maior impedância quando se aplicam impulsos com frentes de onda mais curtas e os esforços foram concentrados somente na elaboração de um modelo que reproduzisse os resultados obtidos nos ensaios, principalmente para as frentes de onda na faixa de 0,5 a 10 μs .

A Figura 8 mostra a configuração adotada para o modelo que reproduz de forma satisfatória as características observadas nos ensaios.

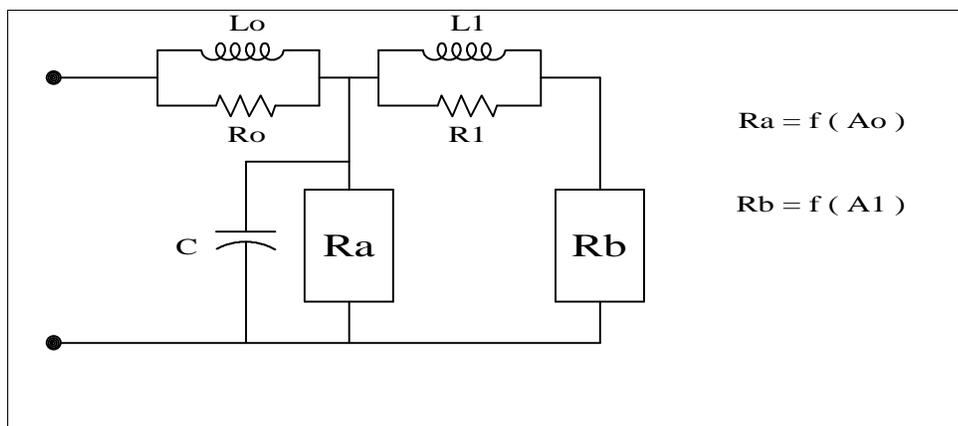


Figura 8 - Modelo de ZnO para Surtos Rápidos

Os componentes do modelo dependem do número de colunas em paralelo, do diâmetro dos discos de ZnO e do comprimento das colunas. O parâmetro de referência é a tensão residual associada à corrente de 10 kA, 8 x 20 μs , a qual é geralmente conhecida como V_{10} .

O comprimento da coluna pode ser facilmente obtido, conhecendo-se a tensão V_{10} do pára-raios completo e a altura de cada disco. No caso específico, a tensão V_{10} e a altura do disco eram 10,4 kV e 3,5 cm, respectivamente. Portanto, o comprimento da coluna pode ser aproximado por:

$$d = \frac{0.035V_{10}}{10.4} \text{ m}$$

Os parâmetros L_1 e R_1 estão associados ao comprimento e ao número de colunas e pode ser calculado por:

$$L_1 = \frac{15d}{n} \mu\text{H}$$

$$R_1 = \frac{65d}{n} \text{ ohms}$$

A indutância L_0 foi incluída com a finalidade de representar a indutância associada aos campos magnéticos nas proximidades do pára-raios, sendo determinada empiricamente por:

$$L_0 = \frac{0.2d}{d} \mu\text{H}$$

A resistência R_0 é utilizada somente para estabilizar numericamente o procedimento de cálculo, sendo igual a:

$$R_0 = \frac{100d}{n} \text{ ohms}$$

A capacitância C corresponde a uma capacitância real, associada aos discos de ZnO e também auxilia na estabilidade do processo numérico. É calculada por:

$$C = \frac{100n}{d} \text{ pF}$$

O modelo é complementado com o conhecimento das resistências não-lineares R_a e R_b , que correspondem à tensão residual do pára-raios.

A Figura 9 mostra a relação entre a corrente de condução e a tensão residual em cada ramo não-linear do modelo. Os valores estão em p.u., referidos ao valor de pico da tensão nominal.

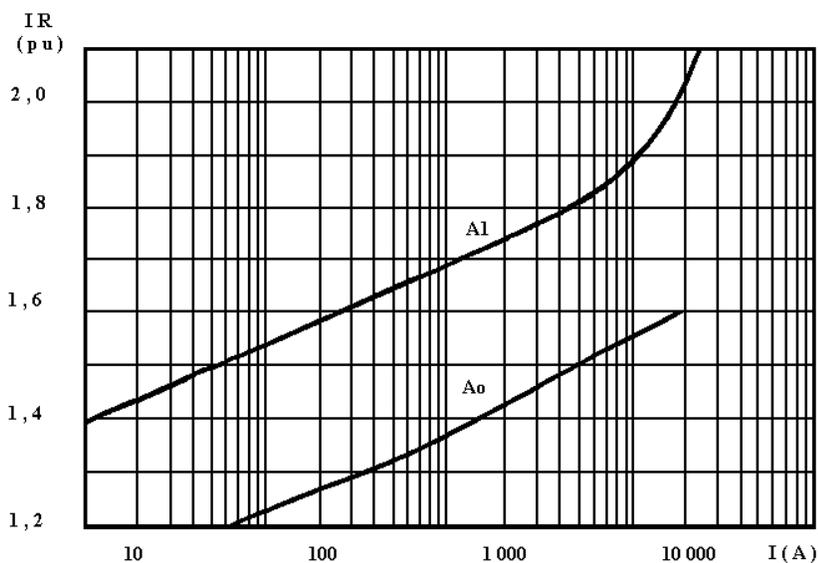


Figura 9 - Características Não-lineares para o Modelo de ZnO

A tensão V_{10} geralmente é relacionada com a tensão nominal através da seguinte expressão:

$$V_{10} = k\sqrt{2}V_n$$

onde k é um fator inerente ao projeto do pára-raios e V_n é a sua tensão nominal em valor RMS.

O modelo em questão foi definido considerando um fator k igual a 1,6. Deste modo, a tensão residual em Volts é obtida através da seguinte expressão:

$$IR = A_n(I) \frac{V_{10}}{1.6}$$

sendo necessário, portanto, para a definição dos valores em Volts, o conhecimento da tensão V_{10} . Os fatores $A_n(I)$ são obtidos da Figura 9.

O modelo foi testado e os resultados considerados satisfatórios, como citado na referência 7, quando comparados com os resultados dos ensaios.

A Figura 10 mostra os resultados comparativos entre as simulações processadas com o modelo e os resultados obtidos nos ensaios.

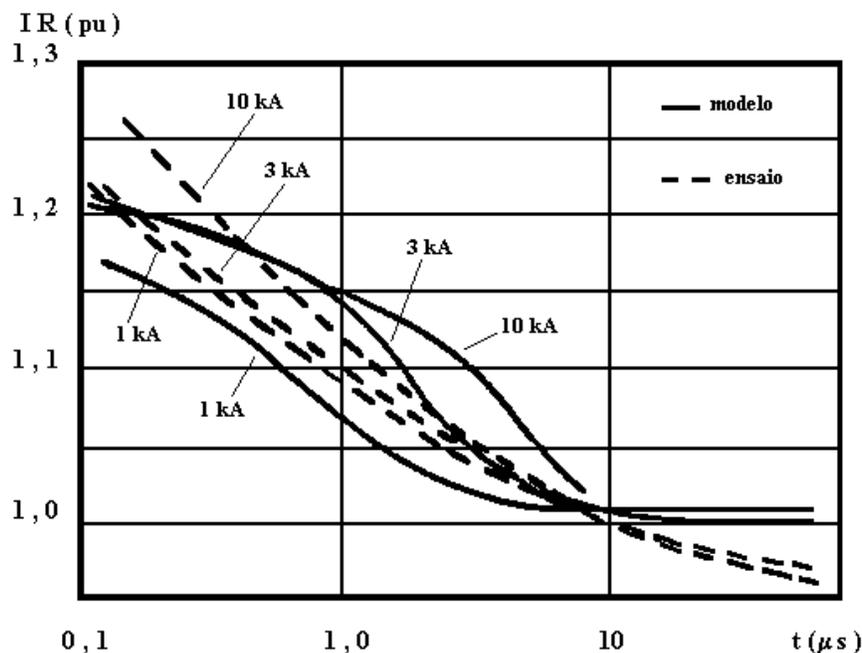


Figura 10 - Comparação entre as Simulações com o Modelo e os Resultados dos Ensaios

Os resultados são geralmente conservativos para correntes acima de 2 kA com tempos de crista maiores que 0,5 μ s. Frentes de onda menores e correntes abaixo de 1 kA resultam em tensões que poderiam ser menores do que a realidade. Entretanto, os casos de corrente de baixa intensidade não são críticos para os estudos de coordenação de isolamento.

Na faixa entre 0,5 μ s e 10 μ s, a diferença entre os resultados obtidos nas simulações e nos ensaios foi de 4 %. Esta diferença está dentro da precisão que seria necessária para os resultados de coordenação de isolamento.

Bibliografia

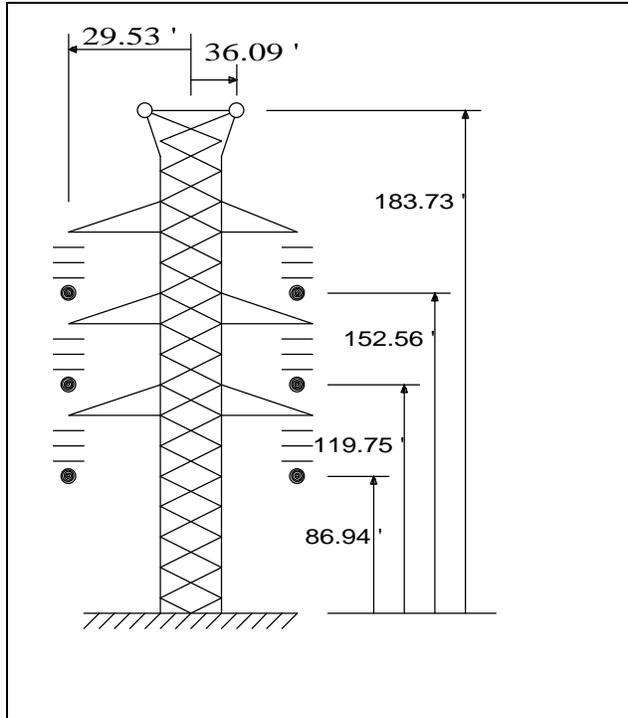
1. Alternative Transients Program Rule Book, K. U. Leuven EMTP Center
2. M. P. Pereira, M. Drummond, "Modelagem de Pára-raios de ZnO em Estudos de Transitórios", VIII SNPTEE, São Paulo, 1986.
3. M. P. Pereira, M. Drummond, "Capacidade de Absorção de Energia e Divisão de Corrente em Pára-raios de ZnO", X SNPTEE, Curitiba, 1989.

- 4 . Fisher, F.A. - Waveform Effects in Zinc Oxide, IEEE Surge Protective Devices Committee Working Group 3.4.11, May 1982, St. Louis.
5. Johnnerfelt, B. Protection Levels for the ASEA HVDC Arresters - TR LKL 82-3, ASEA, 1982.
6. TRANQUELL XE Station Surge Arresters - General Electric.
7. Durbak, D.W. - Zinc Oxide Arrester Model for Fast Surges, EMTP Newsletter, Vol. 5, Nº 1, January 1985.
8. Pereira, M.P., Nora Dias, L.E., Guimarães, E.B., Experiência de FURNAS na Elaboração de Estudos, Especificação e Ensaio de Pára-raios de ZnO, VII SNPTEE, Brasília, 1983.
9. Clayton, R.E., Grant, I.S., Hedman, D.B., Wilson, D.D., Surge Arrester Protection and Very Fast Surges, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS 102, N—8, August 1983.

Capítulo XIII
Casos Complementares

Exercício 2A

Exemplo de aplicação da rotina LINE CONSTANTS para uma linha de transmissão de circuito duplo, de 500 kV, com a seguinte configuração:



condutores de fase :

4 condutores por fase
 espaçamento de 18 inch e $\alpha = 45^\circ$
 $T/D = 0.3748$
 $R = 0.0924$ ohms/mile
 $\phi = 1.258$ inch
 altura no meio do vão igual a 91.04', 58.23'
 e 25.42', fases a, b e c

cabos pára-raios :

$T/D = 0.5$
 $R = 6.74$ ohms/mile
 $\phi = 0.36$ inch
 altura no meio do vão igual a 136.98'

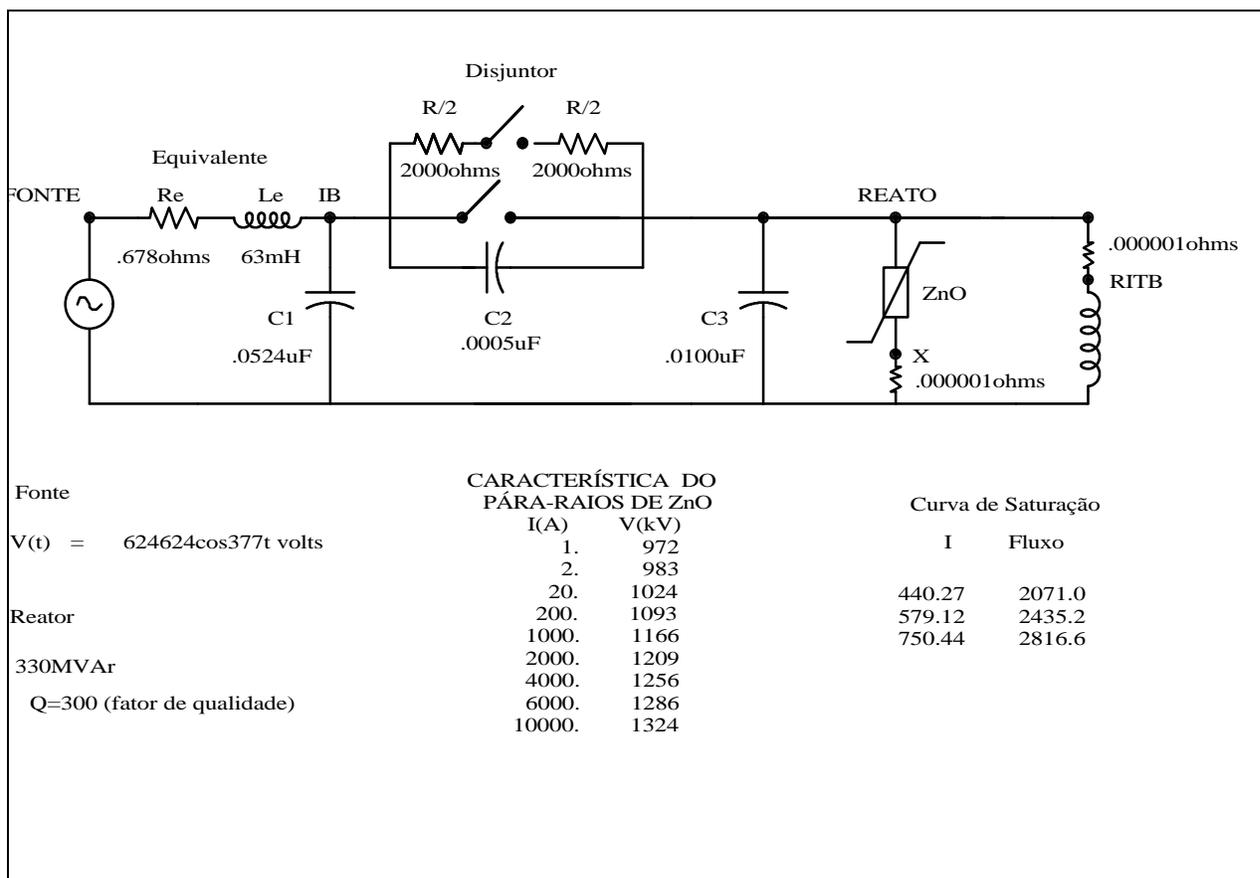
O arquivo do ATP é o seguinte :

```

BEGIN NEW DATA CASE
C      EXERCICIO 2A  -  PARAMETROS DE LINHA -  CIRCUITO DUPLO DE 500 KV
C      ROTINA LINE CONSTANTS
C  ---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
LINE CONSTANTS
ENGLISH
  1.3748  .0924  4      1.258  -29.53  152.56  91.04  18.  45.  4
  2.3748  .0924  4      1.258  -29.53  119.75  58.23  18.  45.  4
  3.3748  .0924  4      1.258  -29.53  86.94  25.42  18.  45.  4
  4.3748  .0924  4      1.258   29.53  152.56  91.04  18.  45.  4
C  ---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
  5.3748  .0924  4      1.258   29.53  119.75  58.23  18.  45.  4
  6.3748  .0924  4      1.258   29.53  86.94  25.42  18.  45.  4
  0.5     6.74   4      .36    36.09  183.73  136.98
  0.5     6.74   4      .36   -36.09  183.73  136.98
BLANK CARD ENDING CONDUCTORS CARDS
  1000.    60.      1 111111 111111 1 37.29  1111
BLANK CARD ENDING FREQUENCY CARDS
C  ---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
BLANK CARD ENDING LINE CONSTANTS
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK CARD ENDING ALL CASES
    
```

Exercício 3A

Exemplo de abertura de reator. Calcular a tensão no terminal do reator, as correntes na câmara principal e na auxiliar do disjuntor e a corrente e a energia no pára-raios. Utilizar DELTAT = 20 μs e TMAX = 30 ms. As correntes de corte é 352 A, tanto para a câmara principal quanto para a câmara auxiliar.



O arquivo correspondente no ATP encontra-se apresentado na página seguinte.

```

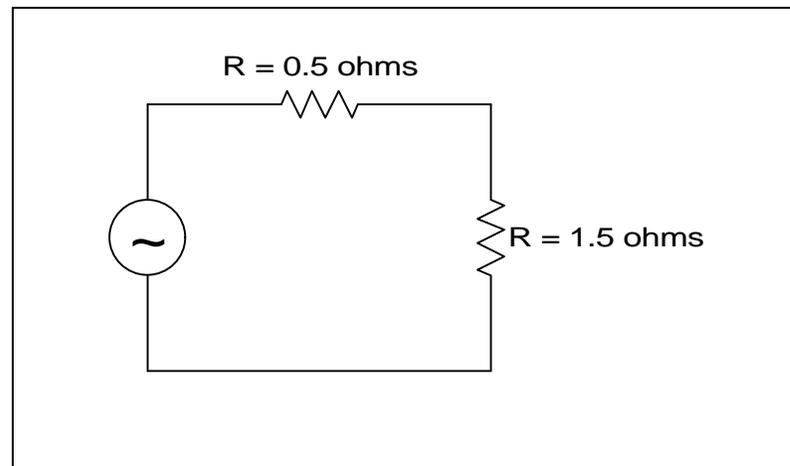
BEGIN NEW DATA CASE
C ABERTURA DE REATOR 765KV/330MVAR - CAPITULO 2 FILE = ATP\SCRATCH\EXE1A.DAT
C DADOS MISCELANEOS
--+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
  20.E-6  30.E-3   60.   60.
    150    1      1      1      1      1
C RAMOS RLC SERIE
C      EQUIVALENTE DE CURTO CIRCUITO
  FONTE  IB      0.678023.746
C      RESISTOR DE ABERTURA DE 4000 OHMS
  IB     A      2000.0
  REATO  B      2000.0
C      REATOR 330MVAR - 765KV - X/R=300
  REATO  RITAB  5.9000
--+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
C      CURVA DE SATURACAO DO REATOR
98 RITAB      440.272071.0      3
    440.27      2071.0
    579.12      2485.2
    750.44      2816.6
    9999
C      PARA RAIOS DO REATOR (ZNO 588KV - 2 COLUNAS)
99 REATO  X      0.0  20.   1  0.0      4
    1.      972.E3
    2.      983.E3
    20.     1024.E3
    200.    1093.E3
    1000.   1166.E3
    2000.   1209.E3
    4000.   1256.E3
    6000.   1286.E3
    10000.  1324.E3
    9999
    X      .00001      1
--+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
C      CAPACITANCIA DE 52.4 NANOFARADS (HEDMAN) - LADO FONTE
  IB      19.740
C      CAPACITANCIA DE 0.50 NANOFARADS - ATRAVES DO DISJ.
  IB REATO 0.1885
C      CAPACITANCIA DE 10.0 NANOFARADS - LADO REATOR
  REATO   3.770
BLANK CARD ENDING BRANCH CARDS
C INTERRUPTORES
--+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
C * DISJUNTOR 765KV COM RESISTOR DE ABERTURA - TEMPO DE INSERCAO 15MS
C      CORTE EM 352 AMPERES
  IB REATO  -1.0  .0069  352.      3
  A  B      -1.0  .0219  352.      3
BLANK CARD ENDING SWITCH CARDS
C FONTE
--+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
14 FONTE  624619.884   60.  120.0      -1.   1.
BLANK CARD ENDING SOURCE CARDS
  REATO
BLANK CARD ENDING OUTPUT CARDS
BLANK CARD ENDING PLOT CARDS
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK CARD ENDING CASE

```

Exercício 9A

Exemplo de aplicação de uma resistência trifásica de 0.5 ohms, através de \$INCLUDE, criada pela rotina DATA BASE MODULE, tal como mostrado no Capítulo VIII.

O circuito correspondente é o seguinte :



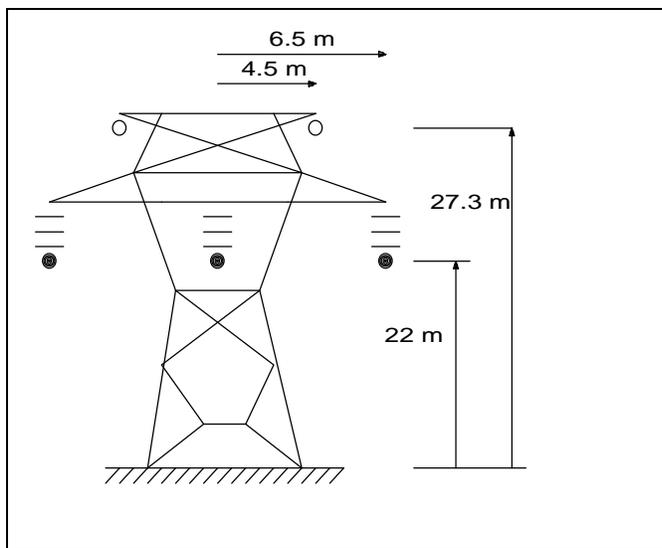
O arquivo correspondente do ATP é o seguinte :

```

BEGIN NEW DATA CASE
C UTILIZACAO DO $ INCLUDE FILE = ATP\SCRATCH\EXE9A.DAT
$PREFIX, \ATP\SCRATCH/
$SUFFIX, .DAT
C DADOS MISCELANEOS
C ---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
.000050 .020
100 1 1 1 1
C CONEXAO DO ARQUIVO COM O MODELO
$INCLUDE, MPP2, NODE1, NODE2, 0.5
C ---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
C ELEMENTOS R L C
NODE2A 1.50
NODE2B 1.50
NODE2C 1.50
BLANK CARD ENDING BRANCH CARDS
BLANK CARD ENDING SWITCH CARDS
C ---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
C FONTES
14NODE1A 10.0 50.0 0.0 -1.0
14NODE1B 10.0 50.0 -120.0 -1.0
14NODE1C 10.0 50.0 120.0 -1.0
BLANK CARD ENDING SOURCE CARDS
NODE1ANODE2A
C ---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
BLANK CARD ENDING OUTPUT CARDS
BLANK CARD ENDING PLOT CARDS
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK CARD ENDING ALL CASES
    
```

Exercício 10

Exemplo de utilização da rotina JMARTI, para calcular os parâmetros de um linha de transmissão, com variação dos parâmetros com a frequência, de 230 kV, circuito simples, com a seguinte configuração :



condutores de fase :

- 1 condutores por fase
- T/D = 0.3161
- R = 0.1151 ohms/km
- $\phi = 2.355$ cm
- altura no meio do vão igual a 8 m

cabos pára-raios :

- T/D = 0.5
- R = 4.189 ohms/km
- $\phi = 0.914$ cm
- altura no meio do vão igual a 15.7 m

Observar que o arquivo de saída do modelo é MPP5.DAT. O arquivo correspondente no ATP é o seguinte :

```

BEGIN NEW DATA CASE
C UTILIZAÇÃO DA ROTINA JMARTI   FILE = ATP\SCRATCH\EXE10.DAT
$OPEN, UNIT=7 FILE=MPP5.DAT   FORM=FORMATTED
$ERASE
C --+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
C CHAMADA DA ROTINA JMARTI
JMARTI SETUP
BRANCH CA    DA    CB    DB    CC    DC
C ENTRADA DE DADOS COMO SE FOSSE UM CASO DE LINE CONSTANTS
LINE CONSTANTS
METRIC
C --+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
  1.3161 .1151  4          2.355  -6.5  22.    8.
  2.3161 .1151  4          2.355   0.0  22.    8.
  3.3161 .1151  4          2.355   6.5  22.    8.
  0.5    4.189  4          0.914  -4.5  27.3  15.7
  0.5    4.189  4          0.914   4.5  27.3  15.7
BLANK CARD ENDING CONDUCTORS CARDS
C --+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
  1500.    60.          1          108.7
  1500.    .01         1          108.7          9 10
BLANK CARD ENDING FREQUENCY CARDS
BLANK CARD ENDING LINE CONSTANTS IMBEDDED USAGE
          1          1
          .30      30      0      1      1      0      0
          .30      30      0      1      1      0      0      .0
C --+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
BLANK CARD ENDING JMARTI CASE
BEGIN NEW DATA CASE
$PUNCH
BEGIN NEW DATA CASE
$CLOSE, UNIT=7 STATUS=KEEP
BLANK

```

Exercício 11

Exemplo de energização de uma linha de transmissão de 230 kV, utilizando o modelo criado pela rotina JMARTI, tal como indicado no exercício 10 anteriormente. Deve ser ressaltado que o modelo é criado em arquivo, o qual deve ser corretamente posicionado no arquivo do ATP, como indicado a seguir :

```

BEGIN NEW DATA CASE
C   ENERGIZAÇÃO DE LINHA DE TRANSMISSÃO COM VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS
C   COM A FREQUÊNCIA ( JMARTI ) FILE=ATP\SCRATCH\EXE11.DAT
C DADOS MISCELÂNEOS
C ---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
C 50.E-6      0.1      60.0      60.0
C   100      1      1      1      1
C ELEMENTO R L ACOPLADO
51AA  BA      20.19
52AB  BB      25.57
53AC  BC
C -----
C COMENTARIOS CRIADOS PELA ROTINA JMARTI
C -----
C * LINHA DE TRANSMISSAO DE 230 KV
C <++++++> Cards punched by support routine on 17-Sep-92 08.53.22 <++++++>
C ***** TRANSPOSED JMARTI line segment *****
C JMARTI SETUP
C BRANCH CA      DA      CB      DB      CC      DC
C LINE CONSTANTS
C METRIC
C 1.3161 .1151  4      2.355  -6.5   22.    8.
C 2.3161 .1151  4      2.355   0.0   22.    8.
C 3.3161 .1151  4      2.355   6.5   22.    8.
C 0.5    4.189  4      0.914  -4.5   27.3   15.7
C 0.5    4.189  4      0.914   4.5   27.3   15.7
C BLANK CARD ENDING CONDUCTORS CARDS
C 1500.    60.      1      108.7
C 1500.    .01      1      108.7      9 10
C BLANK CARD ENDING FREQUENCY CARDS      108.7 MI = 175 KM
C BLANK CARD ENDING LINE CONSTANTS IMBEDDED USAGE
C      1      1
C      .30      30      0      1      1      0      0
C -----
C A SEGUIR ESTÃO OS DADOS NECESSÁRIOS PARA A MODELAGEM DE UMA LT
C SEGUNDO A ROTINA JMARTI - ESTES DADOS SAO OBTIDOS DIRETAMENTE
C DA ROTINA NÃO SENDO NECESSÁRIO CONHECER O FORMATO DE ENTRADA
C -----
-1CA      DA      2.  0.00      -2
      22      0.55934003676881957300E+03
0.260796982286815228E+04 -0.135781491663089333E+04 0.693916180746694750E+03
0.101753117172881253E+04 0.150682584824068181E+04 0.204798875536481683E+04
0.190263132750145065E+04 0.332128387365843992E+04 0.240873295174558953E+05
0.119781313796481307E+06 0.266917430094603952E+05 0.101780233415630399E+06
0.418302205913103244E+05 0.488641924052848307E+06 0.164036483889305848E+07
0.415866232063531178E+07 0.407650923114046455E+08 0.107977068654368207E+09
0.936049448474412710E+08 0.661731863196207062E+08 0.399165487990413756E+08
0.595774343847095818E+08
0.293313776323143150E+00 0.313361516320882272E+00 0.495530255858030622E+00
0.101573509144826702E+01 0.21481268848882220E+01 0.446961093972651736E+01
0.864762388868638965E+01 0.264356452744258057E+02 0.290986552955018681E+03
0.982529204106623525E+03 0.111804034008978147E+04 0.202748018763382584E+04
0.356806026206740717E+04 0.344929062203425420E+05 0.117569646557828063E+06
0.307546901834958583E+06 0.155029839612834459E+07 0.841273342304350622E+07
0.151935910924293008E+08 0.217953282379348539E+08 0.272566835958927759E+08
0.401246992060900331E+08

```

22	0.64921594308609378100E-03		
0.260470576464578693E-02	0.529495594208356530E-02	0.139958575533905630E-01	
0.113770882496496792E+00	0.178208400091980323E-01	0.231164345978431718E+00	
0.136766430970577891E+00	0.157609632125084165E+00	0.165487796100987434E+00	
0.229877551381148765E+00	0.974882533059835522E+00	0.167910598642092275E+02	
0.567824042006462122E+02	0.719023911220833867E+02	0.231891644138062504E+03	
0.614244828921368154E+02	0.125268416363444135E+04	0.364675463268957902E+04	
0.850150092849795183E+05	0.563275319492055569E+06	0.712507249889083356E+08	
-0.719043555977394730E+08			
0.995419809311142379E+00	0.405137565067770212E+01	0.107463155236267092E+02	
0.430993506976713761E+02	0.682384502910272062E+01	0.889669930498136097E+02	
0.103523313846311325E+03	0.115639438840900340E+03	0.131471362870959212E+03	
0.157777295019143680E+03	0.323291665402782485E+03	0.579982417313344286E+03	
0.115079465596963178E+04	0.776007858140379540E+03	0.343027181689537656E+04	
0.132037034129940617E+04	0.122734056503930170E+05	0.231865773142719263E+05	
0.465297647680248193E+05	0.747004578506082762E+05	0.651102490658858588E+05	
0.651753593149516965E+05			
-2CB	DB	2. 0.00	-2
20	0.38749246116142592200E+03		
0.121405536898873880E+04	-0.870119303853746687E+02	0.364055608827936397E+03	
0.112760823609695763E+04	0.132417813837441714E+04	0.171436527924094481E+04	
0.312688784901625923E+04	0.395823848782840742E+04	0.164281847527629544E+04	
0.101322433312337978E+04	0.784681999279945558E+03	0.941560526527538059E+03	
0.236432758857609287E+03	0.700839229467958035E+03	0.824656062603366991E+04	
0.639817647912849953E+04	0.948033500917302263E+04	0.254843148300116118E+05	
0.203983832450721181E+06	0.108598195717139431E+08		
0.223492591485246390E+00	0.267538081222707225E+00	0.382830976165367543E+00	
0.961187618064707317E+00	0.205686780866583252E+01	0.438492942927676222E+01	
0.103483554226259038E+02	0.225388194733706620E+02	0.409868434330669587E+02	
0.609134613343665095E+02	0.850350873558884786E+02	0.145965345475936630E+03	
0.250260922488797548E+03	0.641898463845428069E+03	0.617492875684561569E+04	
0.630743235665142311E+04	0.828250882051350709E+04	0.220677586868538820E+05	
0.176460392254987034E+06	0.941454587130487524E+07		
22	0.58624011716678118500E-03		
0.186956117828511481E-02	0.861823988260160962E-02	0.129787833603459621E-01	
0.415908213692927978E-01	0.431319615547693936E-01	0.630006114065761597E-01	
0.682098661502666959E-01	0.110742889419233673E+00	0.284207118618978183E+00	
0.608479279994848011E+01	0.682094197724824980E+01	0.120843483754650265E+02	
0.118026018615980576E+03	0.447833748704803839E+03	0.552039717438138542E+04	
0.204105146325753267E+05	0.282582019529746395E+05	0.188386468795649795E+06	
0.321329616657026113E+08	-0.308593741777675897E+08	-0.380501631530461610E+09	
0.378984876975771368E+09			
0.708031818735778474E+00	0.325585821282429322E+01	0.496253054758541002E+01	
0.153346592275043197E+02	0.168178211194534982E+02	0.239068882805924262E+02	
0.269271435913750211E+02	0.432278930046402650E+02	0.113717076368970979E+03	
0.232363246970688124E+04	0.267856538417125876E+04	0.442295540059556243E+04	
0.935614917869606871E+04	0.114220471032415845E+05	0.641962088795345554E+05	
0.198584340423379996E+06	0.311741660314882815E+06	0.671673356360325357E+06	
0.159984418334503030E+07	0.162996115435495321E+07	0.237623231136360718E+07	
0.237860854367496958E+07			
-3CC	DC	2. 0.00	-2
20	0.38749246116142592200E+03		
0.121405536898873880E+04	-0.870119303853746687E+02	0.364055608827936397E+03	
0.112760823609695763E+04	0.132417813837441714E+04	0.171436527924094481E+04	
0.312688784901625923E+04	0.395823848782840742E+04	0.164281847527629544E+04	
0.101322433312337978E+04	0.784681999279945558E+03	0.941560526527538059E+03	
0.236432758857609287E+03	0.700839229467958035E+03	0.824656062603366991E+04	
0.639817647912849953E+04	0.948033500917302263E+04	0.254843148300116118E+05	
0.203983832450721181E+06	0.108598195717139431E+08		
0.223492591485246390E+00	0.267538081222707225E+00	0.382830976165367543E+00	
0.961187618064707317E+00	0.205686780866583252E+01	0.438492942927676222E+01	
0.103483554226259038E+02	0.225388194733706620E+02	0.409868434330669587E+02	
0.609134613343665095E+02	0.850350873558884786E+02	0.145965345475936630E+03	
0.250260922488797548E+03	0.641898463845428069E+03	0.617492875684561569E+04	
0.630743235665142311E+04	0.828250882051350709E+04	0.220677586868538820E+05	
0.176460392254987034E+06	0.941454587130487524E+07		

```

22      0.58624011716678118500E-03
0.186956117828511481E-02  0.861823988260160962E-02  0.129787833603459621E-01
0.415908213692927978E-01  0.431319615547693936E-01  0.630006114065761597E-01
0.682098661502666959E-01  0.110742889419233673E+00  0.284207118618978183E+00
0.608479279994848011E+01  0.682094197724824980E+01  0.120843483754650265E+02
0.118026018615980576E+03  0.447833748704803839E+03  0.552039717438138542E+04
0.204105146325753267E+05  0.282582019529746395E+05  0.188386468795649795E+06
0.321329616657026113E+08 -0.308593741777675897E+08 -0.380501631530461610E+09
0.378984876975771368E+09
0.708031818735778474E+00  0.325585821282429322E+01  0.496253054758541002E+01
0.153346592275043197E+02  0.168178211194534982E+02  0.239068882805924262E+02
0.269271435913750211E+02  0.432278930046402650E+02  0.113717076368970979E+03
0.232363246970688124E+04  0.267856538417125876E+04  0.442295540059556243E+04
0.935614917869606871E+04  0.114220471032415845E+05  0.641962088795345554E+05
0.198584340423379996E+06  0.311741660314882815E+06  0.671673356360325357E+06
0.159984418334503030E+07  0.162996115435495321E+07  0.237623231136360718E+07
0.237860854367496958E+07
C -----
C TERMINO DOS DADOS REFERENTES A LINHA DE TRANSMISSAO POR JMARTI
C -----
BLANK CARD ENDING BRANCH CARDS
C INTERRUPTORES
C --+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
BA   CA           0.004      1.0
BB   CB           0.004      1.0
BC   CC           0.004      1.0
BLANK CARD ENDING SWITCH CARDS
C FONTES DE TENSAO
C --+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
14AA      197183.9      60.      0.0      -1.
14AB      197183.9      60.     -120.0     -1.
14AC      197183.9      60.     120.0     -1.
BLANK CARD ENDING SOURCE CARDS
DA   DB   DC
BLANK CARD ENDING OUTPUT CARDS
C --+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
PRINTER PLOT
14410. 0. 100.      DA
BLANK CARD ENDING PLOT CARDS
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK CARD ENDING ALL CASES

```

Exercício 11A

Exemplo de utilização de \$INCLUDE, para a energização de uma linha de transmissão de 230 kV, a mesma considerada no exemplo 10, considerando a variação dos parâmetros com a frequência.

O \$INCLUDE é utilizado diretamente para incluir o modelo da linha de transmissão no arquivo do ATP, a partir do arquivo (MPP5.DAT) do modelo criado pela rotina JMARTI, correspondente ao exemplo 10.

```

BEGIN NEW DATA CASE
$PREFIX, \ATP\SCRATCH/
C      ENERGIZAÇÃO DE LINHA DE TRANSMISSÃO COM VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS
C      COM A FREQUÊNCIA ( MARTI ) - UTILIZAÇÃO DO $INCLUDE DIRETAMENTE
C DADOS MISCELÂNEOS      FILE = ATP\SCRATCH\EXE11A.DAT
C ---+-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
  50.E-6      0.1      60.0      60.0
      100      1      1      1      1
C ELEMENTOS R L ACOPLADOS
C ---+-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
51AA      BA      20.19
52AB      BB      25.57
53AC      BC
C CONEXÃO DO ARQUIVO COM OS DADOS DA MODELAGEM DA LINHA DE TRANSMISSÃO
$INCLUDE, MPP5.DAT
BLANK CARD ENDING BRANCH CARDS
C INTERRUPTORES
C ---+-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
  BA      CA      0.004      1.0
  BB      CB      0.004      1.0
  BC      CC      0.004      1.0
BLANK CARD ENDING SWITCH CARDS
C FONTES DE TENSÃO
14AA      197183.9      60.      0.0      -1.
14AB      197183.9      60.      -120.0      -1.
14AC      197183.9      60.      120.0      -1.
C ---+-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
BLANK CARD ENDING SOURCE CARDS
  DA      DB      DC
BLANK CARD ENDING OUTPUT CARDS
  PRINTER PLOT
  14410. 0. 100.      DA
BLANK CARD ENDING PLOT CARDS
C ---+-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK CARD ENDING ALL CASES

```

Execício 11C

Exemplo de criação de um modelo de uma linha de transmissão, com os parâmetros variando com a frequência, através da rotina DATA BASE MODULE. A linha de transmissão é a mesma já apresentada no exemplo 11A e os dados foram obtidos do exemplo 10 de utilização da rotina JMARTI. A rotina JMARTI permite a criação de um arquivo com os dados necessários ao modelo da linha de transmissão (MPPY.DAT), o qual foi incluído no exemplo em questão. O arquivo correspondente no ATP é o seguinte :

```

BEGIN NEW DATA CASE          --- NOSORT ---
C CASO DE CRIAÇÃO DE UM MODELO A PARTIR DA SAIDA DA ROTINA JMARTI
C FILE = ATP\SCRATCH\EXE11C.DAT
$OPEN, UNIT=7 FILE=MPPY.DAT  FORM=FORMATTED
$ERASE
C  -+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----+-----8
DATA BASE MODULE
$ERASE
ARG, BUS01, BUS02
/BRANCH
C  -+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----+-----8
C DADOS COPIADOS DIRETAMENTE DO ARQUIVO DE SAIDA DA ROTINA JMARTI
-1BUS01ABUS02A                2.  0.00                -2
    22          0.55934003676881957300E+03
    0.260796982286815228E+04  -0.135781491663089333E+04  0.693916180746694750E+03
    0.101753117172881253E+04  0.150682584824068181E+04  0.204798875536481683E+04
    0.190263132750145065E+04  0.332128387365843992E+04  0.240873295174558953E+05
    0.119781313796481307E+06  0.266917430094603952E+05  0.101780233415630399E+06
    0.418302205913103244E+05  0.488641924052848307E+06  0.164036483889305848E+07
    0.415866232063531178E+07  0.407650923114046455E+08  0.107977068654368207E+09
    0.936049448474412710E+08  0.661731863196207062E+08  0.399165487990413756E+08
    0.595774343847095818E+08
    0.293313776323143150E+00  0.313361516320882272E+00  0.495530255858030622E+00
    0.101573509144826702E+01  0.21481268848882220E+01  0.446961093972651736E+01
    0.864762388868638965E+01  0.264356452744258057E+02  0.290986552955018681E+03
    0.982529204106623525E+03  0.111804034008978147E+04  0.202748018763382584E+04
    0.356806026206740717E+04  0.344929062203425420E+05  0.117569646557828063E+06
    0.307546901834958583E+06  0.155029839612834459E+07  0.841273342304350622E+07
    0.151935910924293008E+08  0.217953282379348539E+08  0.272566835958927759E+08
    0.401246992060900331E+08
    22          0.64921594308609378100E-03
    0.260470576464578693E-02  0.529495594208356530E-02  0.139958575533905630E-01
    0.113770882496496792E+00  0.178208400091980323E-01  0.231164345978431718E+00
    0.136766430970577891E+00  0.157609632125084165E+00  0.165487796100987434E+00
    0.229877551381148765E+00  0.974882533059835522E+00  0.167910598642092275E+02
    0.567824042006462122E+02  0.719023911220833867E+02  0.231891644138062504E+03
    0.614244828921368154E+02  0.125268416363444135E+04  0.364675463268957902E+04
    0.850150092849795183E+05  0.563275319492055569E+06  0.712507249889083356E+08
    -0.719043555977394730E+08
    0.995419809311142379E+00  0.405137565067770212E+01  0.107463155236267092E+02
    0.430993506976713761E+02  0.682384502910272062E+01  0.889669930498136097E+02
    0.103523313846311325E+03  0.115639438840900340E+03  0.131471362870959212E+03
    0.157777295019143680E+03  0.323291665402782485E+03  0.579982417313344286E+03
    0.115079465596963178E+04  0.776007858140379540E+03  0.343027181689537656E+04
    0.132037034129940617E+04  0.122734056503930170E+05  0.231865773142719263E+05
    0.465297647680248193E+05  0.747004578506082762E+05  0.651102490658858588E+05
    0.651753593149516965E+05
-2BUS01BBUS02B                2.  0.00                -2
    20          0.38749246116142592200E+03
    0.121405536898873880E+04  -0.870119303853746687E+02  0.364055608827936397E+03
    0.112760823609695763E+04  0.132417813837441714E+04  0.171436527924094481E+04
    0.312688784901625923E+04  0.395823848782840742E+04  0.164281847527629544E+04
    0.101322433312337978E+04  0.784681999279945558E+03  0.941560526527538059E+03
    0.236432758857609287E+03  0.700839229467958035E+03  0.824656062603366991E+04

```

```

0.639817647912849953E+04 0.948033500917302263E+04 0.254843148300116118E+05
0.203983832450721181E+06 0.108598195717139431E+08
0.223492591485246390E+00 0.267538081222707225E+00 0.382830976165367543E+00
0.961187618064707317E+00 0.205686780866583252E+01 0.438492942927676222E+01
0.103483554226259038E+02 0.225388194733706620E+02 0.409868434330669587E+02
0.609134613343665095E+02 0.850350873558884786E+02 0.145965345475936630E+03
0.250260922488797548E+03 0.641898463845428069E+03 0.617492875684561569E+04
0.630743235665142311E+04 0.828250882051350709E+04 0.220677586868538820E+05
0.176460392254987034E+06 0.941454587130487524E+07
22 0.58624011716678118500E-03
0.186956117828511481E-02 0.861823988260160962E-02 0.129787833603459621E-01
0.415908213692927978E-01 0.431319615547693936E-01 0.630006114065761597E-01
0.682098661502666959E-01 0.110742889419233673E+00 0.284207118618978183E+00
0.608479279994848011E+01 0.682094197724824980E+01 0.120843483754650265E+02
0.118026018615980576E+03 0.447833748704803839E+03 0.552039717438138542E+04
0.204105146325753267E+05 0.282582019529746395E+05 0.188386468795649795E+06
0.321329616657026113E+08 -0.308593741777675897E+08 -0.380501631530461610E+09
0.378984876975771368E+09
0.708031818735778474E+00 0.325585821282429322E+01 0.496253054758541002E+01
0.153346592275043197E+02 0.168178211194534982E+02 0.239068882805924262E+02
0.269271435913750211E+02 0.432278930046402650E+02 0.113717076368970979E+03
0.232363246970688124E+04 0.267856538417125876E+04 0.442295540059556243E+04
0.935614917869606871E+04 0.114220471032415845E+05 0.64196208879534554E+05
0.198584340423379996E+06 0.311741660314882815E+06 0.671673356360325357E+06
0.159984418334503030E+07 0.162996115435495321E+07 0.237623231136360718E+07
0.237860854367496958E+07
-3BUS01CBUS02C 2. 0.00 -2
20 0.38749246116142592200E+03
0.121405536898873880E+04 -0.870119303853746687E+02 0.364055608827936397E+03
0.112760823609695763E+04 0.132417813837441714E+04 0.171436527924094481E+04
0.312688784901625923E+04 0.395823848782840742E+04 0.164281847527629544E+04
0.101322433312337978E+04 0.784681999279945558E+03 0.941560526527538059E+03
0.236432758857609287E+03 0.700839229467958035E+03 0.824656062603366991E+04
0.639817647912849953E+04 0.948033500917302263E+04 0.254843148300116118E+05
0.203983832450721181E+06 0.108598195717139431E+08
0.223492591485246390E+00 0.267538081222707225E+00 0.382830976165367543E+00
0.961187618064707317E+00 0.205686780866583252E+01 0.438492942927676222E+01
0.103483554226259038E+02 0.225388194733706620E+02 0.409868434330669587E+02
0.609134613343665095E+02 0.850350873558884786E+02 0.145965345475936630E+03
0.250260922488797548E+03 0.641898463845428069E+03 0.617492875684561569E+04
0.630743235665142311E+04 0.828250882051350709E+04 0.220677586868538820E+05
0.176460392254987034E+06 0.941454587130487524E+07
22 0.58624011716678118500E-03
0.186956117828511481E-02 0.861823988260160962E-02 0.129787833603459621E-01
0.415908213692927978E-01 0.431319615547693936E-01 0.630006114065761597E-01
0.682098661502666959E-01 0.110742889419233673E+00 0.284207118618978183E+00
0.608479279994848011E+01 0.682094197724824980E+01 0.120843483754650265E+02
0.118026018615980576E+03 0.447833748704803839E+03 0.552039717438138542E+04
0.204105146325753267E+05 0.282582019529746395E+05 0.188386468795649795E+06
0.321329616657026113E+08 -0.308593741777675897E+08 -0.380501631530461610E+09
0.378984876975771368E+09
0.708031818735778474E+00 0.325585821282429322E+01 0.496253054758541002E+01
0.153346592275043197E+02 0.168178211194534982E+02 0.239068882805924262E+02
0.269271435913750211E+02 0.432278930046402650E+02 0.113717076368970979E+03
0.232363246970688124E+04 0.267856538417125876E+04 0.442295540059556243E+04
0.935614917869606871E+04 0.114220471032415845E+05 0.64196208879534554E+05
0.198584340423379996E+06 0.311741660314882815E+06 0.671673356360325357E+06
0.159984418334503030E+07 0.162996115435495321E+07 0.237623231136360718E+07
0.237860854367496958E+07
C -+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----+-----8
BEGIN NEW DATA CASE
$PUNCH
BEGIN NEW DATA CASE
$CLOSE, UNIT=7 STATUS=KEEP
BLANK

```

Exercício 11D

Exemplo de utilização do \$INCLUDE, considerando o modelo de linha de transmissão, com os parâmetros variando com a frequência, criado no exemplo 11C.

O arquivo correspondente no ATP é o seguinte, observando que o arquivo do modelo da linha de transmissão é o MPPY.DAT :

```

BEGIN NEW DATA CASE
$PREFIX, \ATP\SCRATCH/
C  ENERGIZAÇÃO DE LINHA DE TRANSMISSÃO COM VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS
C  COM A FREQUÊNCIA ( JMARTI ) FILE = ATP\SCRATCH\EXE11D.DAT
C  DADOS MISCELÂNEOS
C  -----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
    50.E-6      0.1      60.0      60.0
      100        1        1        1        1
C  ELEMENTOS R L ACOPLADOS
C  -----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
51AA  BA                                20.19
52AB  BB                                25.57
53AC  BC
C  CHAMADA DO ARQUIVO COM O MODELO DBM DA LINHA DE TRANSMISSÃO
$INCLUDE, MPPY.DAT , NODE1, NODE2
BLANK CARD ENDING BRANCH CARDS
C  INTERRUPTORES
C  -----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
    BA  NODE1A      0.004      1.0
    BB  NODE1B      0.004      1.0
    BC  NODE1C      0.004      1.0
BLANK CARD ENDING SWITCH CARDS
C  FONTES DE TENSÃO
C  -----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
14AA      197183.9      60.      0.0      -1.
14AB      197183.9      60.     -120.0     -1.
14AC      197183.9      60.     120.0     -1.
BLANK CARD ENDING SOURCE CARDS
    NODE2ANODE2BNODE2C
BLANK CARD ENDING OUTPUT CARDS
C  -----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
    PRINTER PLOT
    14410. 0. 100.      DA
BLANK CARD ENDING PLOT CARDS
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK CARD ENDING ALL CASES

```

Exercício 12

Exemplo de energização estatística de uma linha de transmissão de 230 kv, sem resistores de pré-inserção. Foram consideradas somente 3 manobras de energização estatísticas, para facilitar o processamento do caso. O arquivo no ATP é o seguinte :

```

BEGIN NEW DATA CASE
C ENERGIZAÇÃO ESTATÍSTICA DE UMA LT SEM RESISTORES DE PRÉ-INSERÇÃO
C FILE = ATP\SCRATCH\EXE12.DAT
C DADOS MISCELÂNEOS
C -----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
50.E-6      0.1      60.0      60.0
      100      1      1      1      1      3
      1      2      0      1      0      -1      0      1
C GERADOR DE MANTARO ( 7 MÁQUINAS )
C ELEMENTOS R L ACOPLADOS
C -----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
51GEMA-AMANT-A      .00087      0.0349
52GEMA-BMANT-B      .00083      0.0333
53GEMA-CMANT-C
C * TRANSFORMADOR ELEVADOR DE MANTARO 230/13.8 KV (7)
C -----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
TRANSFORMER      18.781498.13TMAN-A
      18.781      498.13
      132.832      547.95
      368.816      572.85
      957.726      597.76
      9999
1SECA-A      0.12474.0809132.79
2MANT-AMANT-B      0.00130.0441 13.8
C -----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
TRANSFORMER TMAN-A      TMAN-B
1SECA-B
2MANT-BMANT-C
TRANSFORMER TMAN-A      TMAN-C
1SECA-C
2MANT-CMANT-A
C LT SECA -SEIN 220 KV
C -----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
-1SECA-DSEIN-A      0.32341.68152.3435 248.4
-2SECA-ESEIN-B      0.05880.52063.3479 248.4
-3SECA-FSEIN-C
BLANK CARD ENDING BRANCH CARDS
C INTERRUPTORES ESTATISTICOS
C -----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
SECA-ASECA-D      0.005      0.001      STATISTICS
SECA-BSECA-E      0.005      0.001      STATISTICS
SECA-CSECA-F      0.005      0.001      STATISTICS
BLANK CARD ENDING SWITCH CARDS
C * FONTES DE TENSÃO
C -----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
14GEMA-A      11282.7      60.      0.0      -1.
14GEMA-B      11282.7      60.      -120.0      -1.
14GEMA-C      11282.7      60.      120.0      -1.
BLANK CARD ENDING SOURCE CARDS
SEIN-ASEIN-BSEIN-C
BLANK CARD ENDING OUTPUT CARDS
C -----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
PRINTER PLOT
14420. 0.0100.      SEIN-A
BLANK CARD ENDING PLOT CARDS
187794.2SEIN-ASEIN-BSEIN-C
BLANK CARD ENDING STATISTICAL OUTPUT TABULATION CARDS
C -----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK CARD ENDING ALL CASES

```