



**SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

GAT 05  
14 a 17 Outubro de 2007  
Rio de Janeiro - RJ

#### **GRUPO IV**

#### **GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA – GAT**

#### **FERRAMENTA COMPUTACIONAL EM C++ PARA AUXILIAR A ANÁLISE DAS SOBRETENSÕES PROVOCADAS POR MANOBRAS NO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE MATO GROSSO UTILIZANDO SIMULAÇÕES DESENVOLVIDAS NO ATP**

**Antonio J. B. Carvalho \*  
José Ribamar S. S. Neto  
Marcus Vinicius A. Nunes**

**Marcus Guerra da Rocha  
Edgar M. Amazonas Filho  
Ubiratan Bezerra Holanda**

**Diego Augusto R. Batista  
José Maria M. C. Júnior  
Ghendy Cardoso Júnior**

**UFPA – Universidade Federal do Pará**

**Dirceu de Almeida**

**ELETRONORTE – Centrais Elétricas do Norte do Brasil**

#### **RESUMO**

Este trabalho apresenta uma ferramenta computacional criada na linguagem C++, que proporciona ao usuário a possibilidade de selecionar no menu do programa o estudo a ser desenvolvido, como: energização de linhas, transformadores, e bancos de capacitores. A rede elétrica do Estado de Mato Grosso foi modelada no ATP, a partir da sua construção gráfica no ambiente ATPDraw. A interface desenvolvida agiliza a execução de simulações para manobras distintas por meio de um processo automático, que consiste no gerenciamento da execução dos arquivos criados no ATP. Os resultados de saída subsidiam a análise dos impactos das sobretensões provocados por tais manobras.

#### **PALAVRAS-CHAVE**

Sobretensões de Manobras, Análise Transitória, ATP – ATPDraw, Ferramenta Computacional, Linguagem C++.

#### **1.0 - INTRODUÇÃO**

A evolução no consumo da energia elétrica está associada às crescentes exigências quanto à qualidade de serviço. Para que uma rede elétrica seja capaz de assegurar, de uma forma eficiente, um fornecimento contínuo, com uma adequada qualidade das suas características elétricas, como frequência constante, forma de onda da tensão pura ou com pouca distorção de harmônicos, há a necessidade da realização de um conjunto de estudos a nível de planejamento da operação.

Estes estudos não envolvem somente o sistema operando em regime permanente, mas também a ocorrência de fenômenos transitórios. Embora, uma rede elétrica funcione na maioria do tempo em regime permanente, surgem constantemente fenômenos transitórios, que mesmo de curta duração, devem ser minuciosamente estudados. Dentre estes fenômenos destacam-se as sobretensões devidas às manobras dos equipamentos na rede elétrica. O conhecimento de tais fenômenos é muito importante pelas solicitações que os mesmos impõem à rede, devido às elevadas correntes ou tensões que podem surgir. O dimensionamento da rede elétrica realizado de forma incorreta, em relação a tais fenômenos, pode resultar em sérios danos aos componentes do sistema elétrico, além de todos os inconvenientes que tais situações sempre acarretam para os consumidores, como por exemplo, a interrupção no fornecimento da energia elétrica.

Os estudos na área em questão têm um alto grau de complexidade, resultando na necessidade do conhecimento mais aprofundado em relação aos aspectos envolvidos no problema. Dentro deste contexto, este trabalho propõe a aplicação de uma ferramenta computacional desenvolvida na linguagem C++ para estudos de transitórios eletromagnéticos (sobretensões), baseada em simulações processadas no programa ATP, com o intuito de tornar mais rápido a execução de estudos desta natureza, além de proporcionar uma interface amigável para o usuário.

## 2.0 - SOBRETENSÕES EM SISTEMAS ELÉTRICOS

As sobretensões que surgem em uma rede elétrica podem ser divididas em sobretensões de origem externa e de origem interna. As sobretensões de origem externa estão associadas às condições atmosféricas, como por exemplo, as descargas elétricas. As sobretensões de origem interna, por outro lado, estão associadas ao próprio sistema e resultam de um modo geral em ações de manobra (abertura ou fechamento de circuitos).

As sobretensões podem ser classificadas quanto ao grau de amortecimento e tempo de duração em: sobretensões temporárias, sobretensões de manobra e sobretensões atmosféricas (2), como ilustrado na Figura 1.

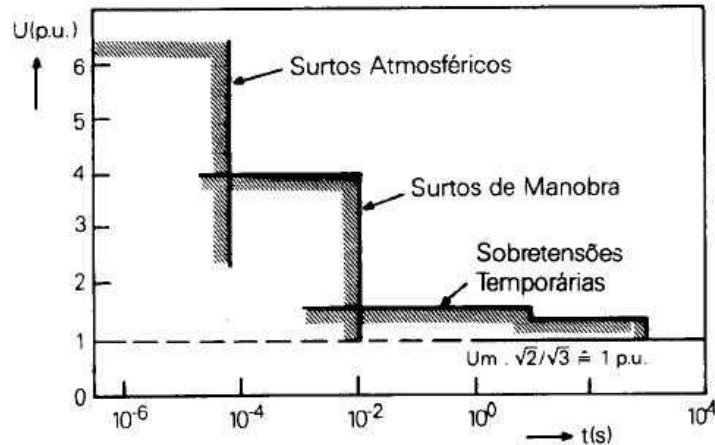


Figura 1 – Tipos de sobretensão em um sistema de extra alta tensão (EAT).

- **Sobretensões Temporárias:** sobretensões fase-terra ou entre fases, oscilatória, de duração relativamente longa e fracamente amortecida ou não amortecida. Caracterizam-se por amplitudes inferiores a 1,5 p.u., frequências menores, iguais ou superiores à fundamental e duração total superior a dezenas de milissegundos. São normalmente causadas por curto-circuitos, manobras, fenômenos não-lineares e efeito Ferranti;
- **Sobretensões de Manobra:** sobretensões fase-terra ou entre fases, devido à operação de um equipamento de manobra, falta ou outro fenômeno, cuja forma de onda é similar ao impulso de manobra. Caracterizam-se por forte amortecimento e curta duração com frente de onda de 100 a 500  $\mu$ s e tempo de cauda da ordem de 2.500  $\mu$ s. São normalmente causadas por energização e religamento de linhas de transmissão e por faltas no sistema;
- **Sobretensões Atmosféricas:** sobretensões fase-terra ou fase-fase, devido a um impulso atmosférico ou outro fenômeno, cuja forma de onda seja similar ao impulso atmosférico. Caracterizam-se por amplitude máxima da ordem de 6 p.u. e curta duração com frente de onda menor que 20  $\mu$ s e tempo de calda da ordem de 50 $\mu$ s.

### 2.1 Manobras no Sistema Elétrico de Potência

As sobretensões de manobra têm sua origem através da operação de equipamentos de manobra (disjuntores, chaves seccionadoras). A seguir são apresentadas as principais manobras realizadas em um sistema real, como: a energização e religamento de linhas, chaveamento de capacitores, aplicação e eliminação de faltas, rejeição de carga e energização de transformadores.

#### 2.2.1 Energização e Religamento de Linhas

A energização e o religamento de linhas de transmissão são manobras típicas que ocorrem em um sistema elétrico, cuja análise pode ser feita considerando-se três períodos distintos (1, 5, 6):

- **Período Transitório:** Prevalcem os efeitos das ondas trafegantes associadas a estes fenômenos e cuja duração é da ordem de alguns milissegundos, dependendo do comprimento da linha manobrada. As sobretensões resultantes podem ser caracterizadas por um valor de pico e uma taxa de crescimento, assumindo uma forma exponencial;
- **Período Dinâmico:** Representa uma transição entre os períodos transitórios e o regime permanente, sendo de natureza repetitiva, caracterizado por pequenas variações na forma de onda que é aproximadamente periódica e composta pela tensão à frequência fundamental e harmônicos de baixas ordens, predominantemente

segundo e terceiro, os quais podem distorcer bastante a forma de onda, podendo ter uma duração de até um segundo;

- Regime Permanente: A tensão é periódica, porém podendo ser bastante distorcida. Geralmente, para uma linha de transmissão, as sobretensões neste período ocorrem quando o terminal receptor está aberto, como no caso de energizações e religamentos, podendo persistir por vários minutos.

As sobretensões resultantes de manobras de energização e religamento dependem de algumas condições do sistema, como por exemplo: potência de curto-circuito, grau de compensação da linha, ponto da onda de tensão em que o disjuntor é fechado, características e comprimento da linha, tensão de pré-manobra, discrepância de fechamento entre os pólos do disjuntor, carga residual da linha, entre outras.

### 2.2.2 Chaveamento de Banco de Capacitores

Os bancos de capacitores shunt são manobrados pelo menos duas vezes ao dia, ou seja, conectados na carga pesada e desconectados na carga leve, e essas manobras normalmente ocasionam transitórios de tensão e de corrente que são prejudiciais às instalações do sistema.

Durante a execução das manobras de chaveamento dos bancos de capacitores surgem sobretensões e sobrecorrentes perigosas. Estes impactos transitórios sobre os demais equipamentos de uma subestação podem ser danosos, por isso a instalação de um banco de capacitores deverá ser sempre precedida de estudos de energização e curto-circuitos próximos a estes. Os estudos quanto à tensão e corrente têm como finalidade (6):

- O dimensionamento do resistor de fechamento do disjuntor de manobra do banco;
- A verificação da necessidade de instalação de pára-raios junto aos bancos;
- Conhecimento das correntes de energização de valor elevado e das freqüências correspondentes;
- Pesquisa do ponto mais desfavorável da subestação que acarreta a maior solicitação de curto-circuito ao equipamento que se deseja estudar.

### 2.2.3 Aplicação e Eliminação da Falta

A importância dos estudos de aplicação de falta se prende basicamente a dois fatos. O primeiro é de que as sobretensões transitórias e sustentadas geradas em um sistema quando da ocorrência de um curto-circuito são fatores decisivos na seleção dos pára-raios, uma vez que estes são escolhidos de modo a não atuarem dinamicamente para esta manobra, pois, caso contrário, a sua capacidade de absorção de energia seria excedida. Baseado nos níveis de proteção oferecidos pelos pára-raios, são aplicadas margens de segurança que levam à determinação dos níveis de isolamento ao impulso atmosférico (BIL) e de manobra (BSL) dos equipamentos. O segundo fato é que este fenômeno tem a si associado dois riscos (5):

- O risco de um curto-circuito monofásico evoluir para uma falta polifásica;
- O risco de um curto-circuito monofásico causar um segundo defeito em uma outra linha do sistema devido ao aparecimento de sobretensões elevadas.

### 2.2.4 Rejeição de Carga

Os estudos de rejeição de carga (perda súbita de carga) visam determinar as solicitações de tensão impostas aos equipamentos e analisar as medidas corretivas e/ou operativas quando da ocorrência de perda repentina de carga no sistema (1, 5). As sobretensões devido à rejeição de carga, como ilustrada na Figura 2, são estudadas sob dois pontos de vista, ou seja, sobretensões transitórias nos primeiros ciclos subseqüentes à rejeição e sobretensões sustentadas que permanecem no sistema, normalmente com distorções harmônicas provocadas pela saturação dos elementos não-lineares do sistema (transformadores e reatores).

### 2.2.5 Energização de Transformadores

Os estudos de energização de transformadores têm por objetivo propiciarem maior flexibilidade operativa e rapidez nos restabelecimentos da continuidade de serviço quando da ocorrência de distúrbios. Assim, é necessário verificar a possibilidade de se energizarem os transformadores pelos lados de alta e baixa tensão. A energização de um transformador de potência geralmente provoca sobretensões, como mostra a Figura 2.10, com

forte conteúdo de harmônicos e baixo amortecimento, devido às características de saturação do seu núcleo de ferro. 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 também elevadas. No geral o amortecimento é baixo porque a corrente de "inrush" permanece por muito tempo (as perdas no ferro costumam ser muito pequenas) (1, 6).

### 3.0 - FERRAMENTA COMPUTACIONAL

Esta nova ferramenta foi desenvolvida na linguagem de programação C++, com auxílio da ferramenta Borland C++ Builder 5, consiste de uma interface gráfica que possibilita ao usuário desenvolver diversos estudos de transitórios eletromagnéticos, com um mínimo de esforço (7).

Considerando os aspectos estruturais deste software, o mesmo pode ser definido como um aplicativo computacional integrado ao ATP, que é um software que já possui um grande reconhecimento devido sua robustez quanto a solução para estudos de transitórios eletromagnéticos. A interface gráfica do usuário, GUI (*Graphic User Interface*), foi dividida em 7 módulos, sendo um módulo principal e mais 6 módulos secundários. Interagindo diretamente com a GUI existe um banco de dados, ver Figura 2, que é alimentado através de dados provenientes dos arquivos de entrada do ATP.

#### 3.1 Módulo Principal ou de Entrada

Este módulo apresenta a tela inicial do aplicativo, ver Figura 3, onde são definidas as configurações iniciais dos estudos de transitórios decorrentes de manobras, como:

- Inicialização dos Arquivos de Entrada do ATP: são inicializados, pelo usuário, os arquivos de dados de entrada para o ATP, modelados previamente no ATPDraw, que serão estudados através do aplicativo, podendo ser selecionados até dois casos diferentes, ou seja, podem ser realizados até dois estudos simultâneos.
- Escolha do Arquivo: o usuário deve selecionar que arquivo deverá ser realizado o estudo.
- Seleção do Estudo: é definido pelo o usuário que estudo ele pretende realizar, entre as seguintes opções: chaveamento de banco de capacitores, energização de linha, energização de transformador, aplicação de curto-circuito e rejeição de carga.

Nesta etapa de processamento são realizadas a inicialização e a alimentação do banco de dados, a partir das configurações iniciais definidas pelo o usuário, onde é feita uma leitura prévia nos arquivos .atp, inicializados pelo o usuário, com o objetivo de armazenar os dados de interesse dos elementos da rede elétrica, para o aplicativo, nas tabelas do banco de dados.

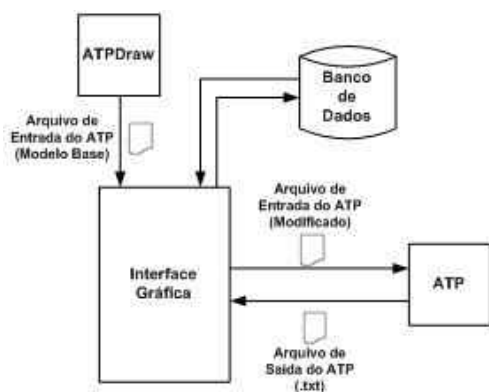


Figura 2 – Interações da interface gráfica



Figura 3 - Tela inicial do aplicativo

#### 3.2 Módulos Secundários

Estes módulos são acionados toda vez que o usuário seleciona o estudo que deseja realizar, sendo que cada um apresenta uma característica própria que depende do estudo correspondente. Nos módulos de I a V, são os

estudos propriamente ditos, enquanto que o módulo VI, corresponde a um módulo gráfico, que é acionado pelos outros módulos, com o intuito de mostrar os resultados na forma de gráficos das simulações realizadas

### 3.2.1 Módulo I – Chaveamento de Banco de Capacitores

O estudo do chaveamento de banco de capacitores em um determinado sistema é realizado neste módulo, ver Figura 4, podendo ser realizado de maneira bastante intuitiva, onde o usuário apenas tem que selecionar o banco de capacitor que deseja realizar o estudo e informar os instantes de chaveamento para cada fase, sendo que este último pode ser determinado pelo próprio usuário ou calculado por meio de estudos estatísticos, no próprio software ATP.

### 3.2.2 Módulo II – Energização de Linha

A energização de linhas é realizada neste módulo, ver Figura 5, onde para isso deve se selecionar a linha na qual se deseja energizar, definir os instantes de energização, o que é feito de maneira semelhante ao Módulo I, e por último definir alguns parâmetros que são característicos para esses tipos de estudos, como: resistência de pré-inserção e o tempo de dispersão dos pólos.



Figura 4 - Tela do módulo I



Figura 5 - Tela do módulo II

### 3.2.3 Módulo III – Energização de Transformadores

Este módulo é responsável pela energização de transformadores, ver Figura 6, onde para a realização deste, o procedimento é semelhante ao realizado no módulo II, sendo a única diferença é que neste caso é selecionado um transformador ao invés de uma linha.

### 3.2.4 Módulo IV – Aplicação de Curto-Circuito

O estudo da aplicação de curto-circuito em sistemas elétricos, é realizada através deste módulo, ver Figura 7, onde para isso são necessárias as definições de alguns parâmetros que são o tipo de falta, instantes de tempo de início e fim da falta, e por último a localização da falta.



Figura 6 - Tela do módulo III

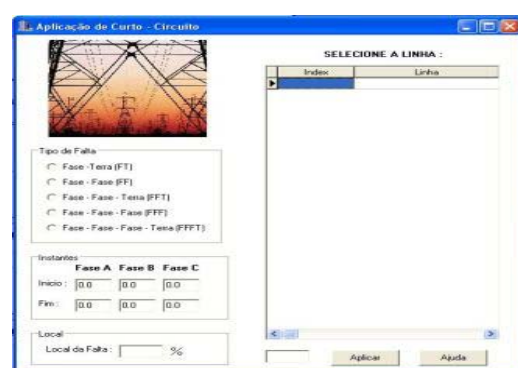


Figura 7 - Tela do módulo IV

### 3.2.5 Módulo V – Rejeição de Carga

Para estudos de rejeição de carga deve ser selecionado este módulo, ver Figura 8, onde o procedimento para se realizar este estudo, consiste da abertura de um terminal em instantes de tempo pré-definidos pelo usuário e selecionar o terminal da linha para efetuar a manobra.

### 3.2.6 Módulo VI – Gráficos

As apresentações gráficas dos resultados das simulações realizadas no ATP, por meio desta ferramenta, são ilustradas através deste módulo, ver Figura 9, proporcionando ao usuário duas análises simultâneas, onde ainda, pode se selecionar qual grandeza deseja analisar ( tensão ou corrente), e em quais fases (fase A, fase B ou fase C). Uma outra funcionalidade que este módulo propicia, é a comparação com as curvas de valores de padrões, especificados nas normas vigentes ou estabelecidas pelo próprio usuário.



Figura 8 - Tela do módulo V



Figura 9 - Tela do módulo VI

## 4.0 - ESTUDO DE CASO

### 4.1 Descrição da Rede Elétrica e Modelagem no ATPDraw

A rede elétrica utilizada nas simulações pertence à ELETRONORTE – Centrais Elétricas do Norte do Brasil, concessionária de produção e transmissão de energia elétrica, a qual opera também no estado do Mato Grosso, além de outras regiões do Brasil. A área do Mato Grosso, ver Figura 10, tornou-se auto-suficiente em termos de energia elétrica, devido à implantação de novas usinas, com isso as redes em 230 e 500 kV passaram a ser utilizada como um sistema exportador da energia excedente para o SIN – Sistema Interligado Nacional (1).

A modelagem da rede elétrica através da interface ATPDraw, ver Figura 11, seguiu fielmente o diagrama unifilar do sistema de transmissão do Mato Grosso, baseada nos parâmetros e características elétricas fornecidos pela concessionária de energia elétrica. Esta representação consiste de modelos detalhados para geradores, transformadores, linhas de transmissão (modeladas a parâmetros distribuídos), cargas, reatores, bancos de capacitores, chaves, etc. (3, 4).

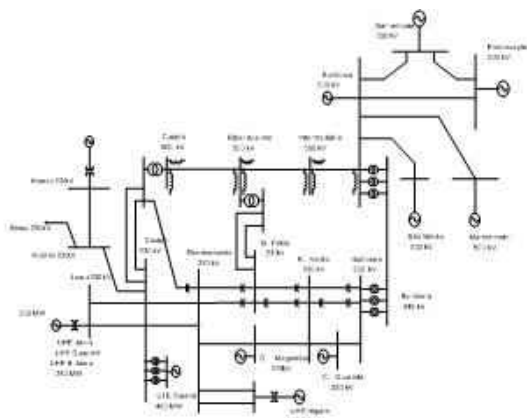


Figura 10 - Tela inicial do aplicativo

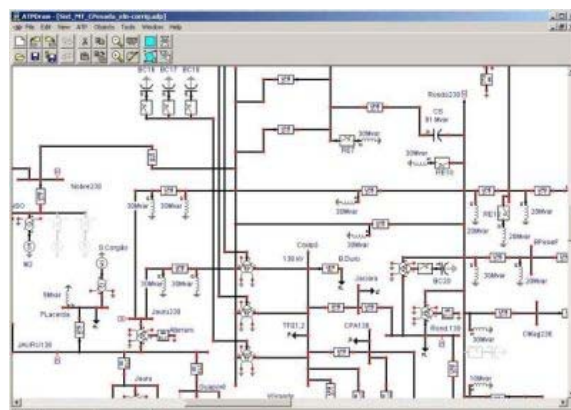


Figura 11 - Tela inicial do aplicativo



## 4.2 Resultados das Simulações

Em função da influência da aleatoriedade dos instantes de operação dos pólos dos disjuntores, os tempos de chaveamento foram efetuados por análise probabilística, envolvendo a execução de um número significativo de casos, 100 energizações, que possibilitaram a determinação do caso mais crítico, ou seja, com maior sobretensão, sendo o mesmo simulado de forma determinística. Este estudo estatístico foi obtido diretamente do ATP por meio do modelo *SWITCH STATISTIC*, onde o número de casos de energização a serem analisados é executado através do menu do ATPDraw (ATP | Settings | Switch/UM) (1, 3).

### 4.2.1 Energização de Linhas

O perfil da tensão no terminal da SE Ribeirãozinho, durante a ocorrência de energização da linha Ribeirãozinho-Cuiabá 500 kV, ver Figuras 12a e 12b. A simulação considera a ocorrência um curto-circuito monofásico (fase-terra), no momento da energização, no meio da linha.

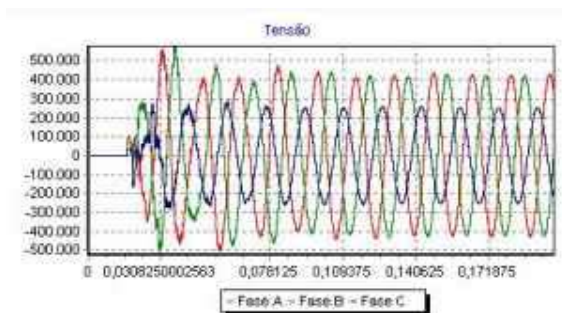


Figura 12a – Energização de linha

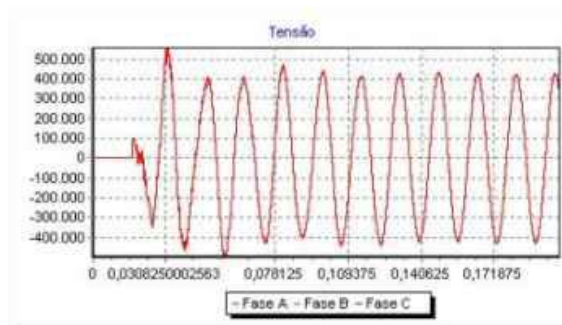


Figura 12b – Energização de linha

As condições, que resultaram as solicitações mais severas no modo estatístico, foram reproduzidas no modo determinístico, com um tempo de simulação de 300 ms. Foram consideradas às condições de energização sem a ocorrência de falta e com a presença de resistores de pré-inserção de 400  $\Omega$ , com tempo médio de inserção de 8 ms.

### 4.2.2 Religamento de Linhas

A simulação apresentada considera o religamento da linha Ribeirãozinho- Cuiabá, pelo terminal da linha da SE Ribeirãozinho. Em seguida, são apresentados os registros do comportamento das sobretensões registradas para todas as fases e somente na fase A, ver Figuras 13a e 13b.

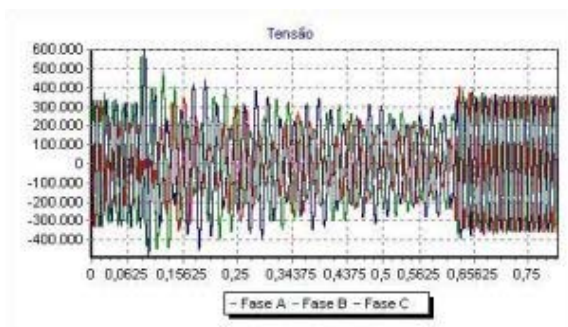


Figura 13a – Religamento de linha

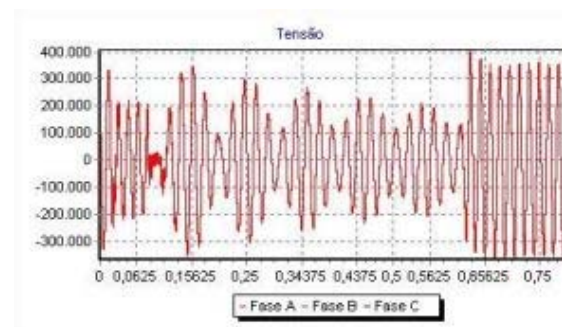


Figura 13b - Religamento de linha

A simulação começa com a aplicação de um curto-circuito no meio da linha de transmissão Ribeirãozinho – Cuiabá, em 500 kV, provocando a atuação do sistema de proteção em um intervalo de tempo de 80ms. Este sistema atua abrindo o disjuntor do terminal da SE Ribeirãozinho, em 60 ms, em seguida ocorre a transferência de disparo (transfer trip) para o disjuntor da SE Cuiabá abrir, ocorrendo 20 ms após a abertura do primeiro. O religamento da linha acontece após um intervalo de tempo de 500 ms (tempo morto), através da SE Ribeirãozinho, terminal líder. O sucesso de um religamento está associado à avaliação do sincronismo do sistema, após o fechamento do disjuntor, em um intervalo de tempo de 220 ms.

#### 4.2.3 Energização de Bancos de Capacitores

A simulação da energização do banco de capacitores (30 MVar) na SE Sinop 230 kV, ver Figuras 14a e 14b, apresenta o perfil de tensão registrado na SE Sinop, no barramento de 230 kV, sendo registrada maior sobretensão na fase A.

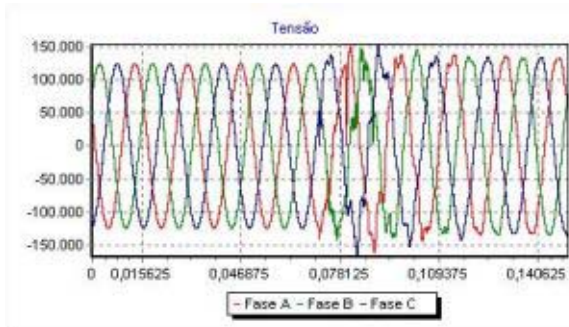


Figura 14a – Chaveamento de Banco de Capacitores

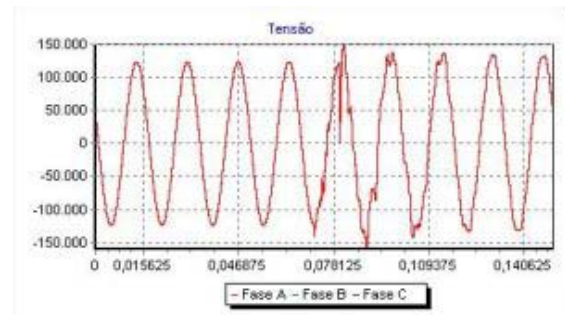


Figura 14b - Chaveamento de Banco de Capacitores

## 5.0 - CONCLUSÃO

De forma geral, este trabalho contribuiu para o desenvolvimento de uma interface gráfica, aplicada aos estudos de sobretensões de manobra, baseada em simulações digitais por meio do programa ATP. Este processo foi realizado por meio de linhas de comando que executam automaticamente o ATP, por meio do seu programa principal TPBIG.exe, além de rotinas que fazem a leitura dos dados armazenados no arquivo de entrada, identificando as posições de cada elemento modelado, a fim de possibilitar a alteração dos seus parâmetros quando necessário.

A implementação de um sistema de simulações baseado em uma linguagem de alto nível como a C ++ permite maior flexibilidade na interação com outros programas. Esta ferramenta agiliza a execução de simulações para fenômenos distintos por meio de um processo automático, que utiliza a modelagem do sistema uma única vez, ou seja, não é necessário criar um arquivo de dados para cada fenômeno a ser analisado, pois o programa faz as modificações diretamente no arquivo de dados gerado pelo ATPDraw.

Os resultados provenientes das simulações subsidiam a análise das solicitações decorrentes dos fenômenos transitórios eletromagnéticos, que identificam a existência de algumas restrições operativas não contempladas nos estudos de regime permanente e de estabilidade dinâmica.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Metodologia para Estudos de Sobretensões Originadas por Manobras em Sistemas Elétricos de Potência – CARVALHO, A. J. B.; Dissertação Submetida à Universidade Federal do Pará para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, 2007.
- (2) D'AJUZ, A.; FONSECA, C. S.; CARVALHO, F. M. S.; et al.; 1987. Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento - Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão, FURNAS, Universidade Federal Fluminense, Niterói, Rio de Janeiro, 1987.
- (3) CAUE – Comitê Argentino de Usuários de EMTP/ATP, Rule Book – ATP – Alternative Transients Program, Buenos Aires, Diciembre 2001.
- (4) HØIDALEN, H. K.; 2004. New features in ATPDraw version 4.0 for advanced simulation of Electromagnetic Transients in Power Systems.
- (5) MARTINEZ, J. A.; 1997. Computer Analysis of Electric Power System Transients – Selected Readings, IEEE.
- (6) GREENWOOD, A.; 1991. Electrical Transients in Power Systems. John Wiley & Sons Inc., New York, 1991.
- (7) SCHILDT, H., 1998. C++: The complete Reference. Mc Graw-Hill.