



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

GAT 08  
14 a 17 Outubro de 2007  
Rio de Janeiro - RJ

#### **GRUPO IV**

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

### **PROPOSTA DE APLICATIVO PARA AUXÍLIO NA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DINÂMICO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

**Carlos Eduardo Vieira de Mendonça Lopes**

**ELETROBRÁS – Centrais Elétricas Brasileiras**

#### **RESUMO**

A análise do comportamento dinâmico de sistemas elétricos é realizada comumente a partir da integração numérica (simulação passo a passo) das equações inerentes através da utilização de simulação computacional. Este método permite uma abrangente representação de modelos e confiança nos seus resultados. A análise das simulações é, em geral, realizada pelo exame visual de uma grande quantidade de curvas geradas pelo aplicativo de solução, o que pode ser dispendioso e demandar muito tempo para um analista, assim sendo, este trabalho propõe uma ferramenta computacional incorporada aos programas de estabilidade correntes, para obter uma forma rápida e confiável de avaliar o comportamento dinâmico de um sistema elétrico.

#### **PALAVRAS-CHAVE**

Dinâmica de sistemas elétricos, Estabilidade, Índices de estabilidade, Avaliação de comportamento.

#### **1.0 - INTRODUÇÃO**

No Brasil, a aplicação de estudos de estabilidade tornou-se mais habitual a partir da década de 70. Inicialmente, os programas utilizados eram de versões estrangeiras, de onde, evoluiu-se para códigos mais adaptados às necessidades, num trabalho conjunto entre empresas do setor elétrico, com resultados muito proveitosos, com a inclusão de representações detalhadas de equipamentos existentes e evolução dos algoritmos de forma a mantê-los alinhados ao estado da arte em simulação de sistemas elétricos. A evolução dos microcomputadores tipo PC tornou cada vez mais maleável a realização dos estudos de estabilidade.

Hoje se encontram disponíveis programas nacionais, comparáveis aos padrões internacionais. Todavia, a evolução do sistema elétrico e o aparecimento de novas tecnologias, são sinalizadores da necessidade da manutenção de um permanente esforço de desenvolvimento tecnológico de modo a manter uma infra-estrutura capaz de fazer frente aos desafios de planejamento e operação, de modo especial, em um ambiente de crescentes incertezas.

Pode-se considerar que o interesse por avaliações cada vez mais precisas do desempenho dinâmico dos sistemas de potência aumenta na medida do crescimento da complexidade do próprio sistema. No cerne dessa complexidade estão sucessivas inovações tecnológicas e, mais recentemente, significativas alterações no ambiente do setor, advinda de processos de liberalização do mercado elétrico, alterações de regulamentação e surgimento de novos agentes.

O ambiente acima descrito faz com que cada vez mais o sistema opere perto dos seus limites de carregamento. Diante deste cenário, se torna evidente a necessidade de se desenvolver novas e melhores tecnologias para que o sistema possa ser analisado de uma forma transparente, segura e confiável.

Neste ínterim, para a facilitação do processo de diagnóstico dinâmico, este trabalho trata da elaboração de um aplicativo computacional como ferramenta auxiliar, que tenha como entrada os arquivos contendo as curvas geradas pelo programa de simulação numérica passo a passo, de modo que faça a leitura das mesmas e forneça índices de estabilidade, provenientes das curvas dinâmicas, definidos pelo próprio usuário, conforme seus critérios de aplicação e facilidades do aplicativo.

## 2.0 - MOTIVAÇÃO

Para análise em regime dinâmico de possíveis ocorrências em um sistema de potência de grande porte, se faz necessária simulação digital para a averiguação do comportamento. A simulação através do método de integração numérica é atualmente a melhor ferramenta disponível, por permitir a representação de modelos mais abrangentes, fornecendo resultados confiáveis.

Com este método corrente para estudos de estabilidade, é possível a determinação minuciosa do desempenho elétrico ao longo do tempo, adotando-se um nível de detalhamento de representação individual dos equipamentos, limitado apenas pelo maior ou menor conhecimento de características específicas de cada componente – mais uma questão comercial do que propriamente uma dificuldade tecnológica.

Neste contexto, foi detectado por engenheiros da área de planejamento da expansão, que a análise dos resultados das simulações de estabilidade, que em geral é realizada pelo exame visual de uma grande quantidade de curvas geradas pelo aplicativo de solução, pode ser dispendiosa e demandar muito tempo para um profissional, assim sendo, como uma ferramenta auxiliar para otimizar este trabalho, foi desenvolvido, o AVALie – Avaliação de índices de estabilidade, um programa de computador de interface amigável que tem como entrada arquivos contendo as curvas dinâmicas geradas pelo aplicativo de solução por integração numérica, no caso o ANATEM – Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos, desenvolvido pelo CEPEL – Centro de Pesquisas em Energia Elétrica.

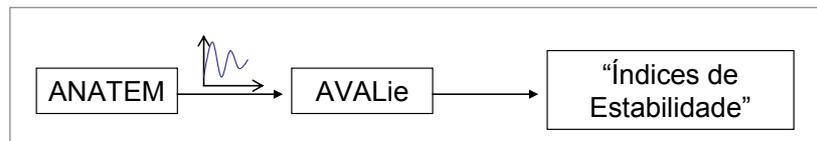


Figura 1 – Integração ANATEM - AVALie

## 3.0 - ESCOPO DA PROPOSTA

Para delinear a proposta da ferramenta de auxílio na análise de desempenho dinâmico de sistemas elétricos, serão apresentadas primeiramente algumas características do ANATEM e, posteriormente, a proposta do AVALie.

### 3.1 O programa ANATEM

O ANATEM é um software desenvolvido pelo CEPEL, para a realização de estudos de estabilidade à frequência fundamental tanto na operação como no planejamento de sistemas elétricos de potência. Este aplicativo é empregado no setor elétrico brasileiro por quase a totalidade das empresas.

O ANATEM utiliza o método trapezoidal de integração numérica, para solucionar as equações diferenciais inerentes, e apresenta grandes facilidades para a modelagem dos equipamentos através de seus modelos *built-in*, internos ao programa, ou modelos tipo CDU (Controlador Definido pelo Usuário), onde o usuário estabelece e constrói os modelos de elementos que apresentam características dinâmicas, através de seus diagramas de bloco.

Quanto às ocorrências e perturbações aplicadas ao sistema, o ANATEM possui diversos eventos que podem ser aplicados, limitados à destreza do usuário, como por exemplo, curto-circuito, abertura de circuito, bloqueio de elo CC, perda de equipamentos, rejeição de carga, energização de linhas de transmissão, religamentos, etc.

Existem diversas variáveis que podem ser solicitadas para a plotagem de seu comportamento no tempo, pode-se elencar algumas principais:

- Variáveis de máquina síncrona, como:
  - Ângulo do eixo q de geradores;
  - Tensão e corrente de campo dos geradores;
  - Frequência dos geradores;
  - Potência elétrica ativa e reativa interna dos geradores;
  - Potência mecânica das turbinas;
  - Sinal estabilizador aplicado no regulador de tensão dos geradores;
  - Potência acelerante.
- Variáveis de barra CA, como:
  - Módulo da tensão da barra;
  - Potência elétrica reativa correspondente ao “shunt” da barra;
  - Potências ativas, reativas e aparentes da carga total na barra CA.
- Variáveis de circuitos CA, como:
  - Fluxos de potência ativa, reativa e módulo do circuito CA;
  - Corrente do circuito CA.
- Variáveis de CDU (saída de blocos)
- Variáveis de motor de indução
- Variáveis de cargas dinâmicas
- Variáveis de dispositivos FACTS
- Variáveis de barras, circuitos e elos CC
- Variáveis de conversores CA-CC

Ressalta-se ainda que através de CDU o usuário pode gerar mais variáveis.

### 3.2 O programa AVALie

Com fim auxiliar a análise dinâmica dos sistemas elétricos, foi desenvolvido um programa para a facilitação do processo de diagnóstico do desempenho dinâmico, que tem como entrada arquivos de extensão “plt” gerados pelo programa ANATEM. Estes arquivos contêm as curvas no tempo conforme requerido para a simulação. O AVALie deve fazer a leitura dos mesmos e fornecer os índices de estabilidade conforme a necessidade do usuário.

O aplicativo foi desenvolvido em Linguagem C com Interface Windows, pretendendo fornecer uma interação amigável com o usuário.

#### *Os índices de estabilidade:*

Entendem-se aqui como índices de estabilidade, parâmetros solicitados pelo usuário para mensurar a “saúde” do sistema, estes índices são retirados da monitoração das curvas das variáveis ao longo do tempo e ainda, quando da realização da simulação de diversos casos, podem ser analisados estatisticamente. Tais índices são baseados, por exemplo, no amortecimento das oscilações, valores de *overshoot*, taxa de variação, valores de pico, tempo de acomodação, etc.

Salienta-se que toda a simulação dinâmica será realizada por método de integração numérica através do programa ANATEM, o qual, por meio de recursos de execução, pode ser responsável pela simulação de uma grande quantidade de casos em um tempo computacional aceitável para estudos *off-line* e de planejamento.

#### *O que monitorar nas curvas?*

A prática dos índices adotados no programa foi proposta através da consulta a usuários do ANATEM, os quais expuseram suas maiores necessidades quanto à monitoração das grandezas. Assim foram determinados índices internos ao programa, que podem ser requisitados pelo usuário conforme melhor lhe aprouver.

Podem-se classificar estes índices em três conjuntos, que podem fornecer uma análise qualificada a respeito do desempenho do sistema, relativos à:

## a. Grandeza monitorada.

- Amortecimento;
- Valor máximo;
- Valor mínimo;
- Valor inicial ( $t_0$ );
- Máximo desvio do valor inicial;
- Valor final em regime (tempo final da simulação);
- Máximo valor de “pico a pico”;
- Variações instantâneas;
- Diferença entre os valores pré-falta e em regime (fim da simulação);
- Diferença entre valor máximo e mínimo;
- Ultrapassagem de valor pré-determinado;
- Ultrapassagem de valor de uma faixa;
- Consulta de valor absoluto dado o tempo.

## b. Tempo.

- Frequência natural das oscilações;
- Sobre elevação (overshoot);
- Tempo de subida a uma determinada percentagem;
- Tempo de acomodação para uma determinada percentagem;
- Tempo de permanência de ultrapassagem de valor predeterminado.

## c. Comportamento das curvas.

- Detecção de um comportamento oscilatório “simétrico”;
- Detecção de coerência entre diferentes curvas;
- Perda de sincronismo.
- Afundamento de tensão.

## d. Análise estatística.

- Valores médios;
- Somatórios;
- Desvio padrão.

Estas possíveis saídas do programa são as vislumbradas até o momento, contudo, um trabalho contínuo de adição e melhoria dos mesmos é realizado para a adaptação do programa as diversas áreas de interesse.

#### 4.0 - APLICAÇÃO PRÁTICA E RESULTADOS

O programa proposto pode ser útil na aplicação em diversas análises de regime dinâmico, proporcionando facilidade nos estudos. Assim serão apresentadas sumariamente duas aplicações com o intuito de exemplificar sua maleabilidade.

##### 4.1 Aplicação no monitoramento de sobretensões

Seja por exemplo, um estudo de energização de linhas de transmissão, onde se deseja observar a sobretensão na barra terminal. O programa pode ser ajustado para acusar as tensões acima de um determinado valor conforme o critério de monitoração adotado. Seja, por exemplo, 1.15 pu. Em um estudo de um trecho de interligação com seis subestações intermediárias e cinco linhas de transmissão, foram simuladas as aberturas de todos os terminais e para a verificação das sobretensões ocorridas, o AVALie apontou adequadamente todos os casos de violação. A figura 2 ilustra uma das curvas e a respectiva acusação do programa.

##### 4.2 Aplicação no monitoramento do amortecimento de oscilações

Seja agora um exemplo de verificação do comportamento dinâmico de uma máquina em um sistema, onde se deseja a monitoração do amortecimento das suas oscilações para diferentes patamares de carga e configurações de geração. Todos estes cenários foram simulados através do programa de simulação passo a passo e o AVALie, proporcionou a sua avaliação com a computação dos amortecimentos. A figura 3 ilustra uma das curvas e a monitoração indicando um caso com amortecimento abaixo do requerido.

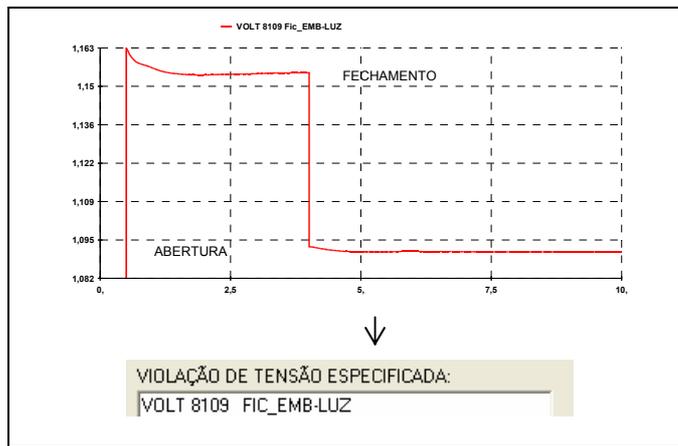


Figura 2 – Monitoração de sobretensão

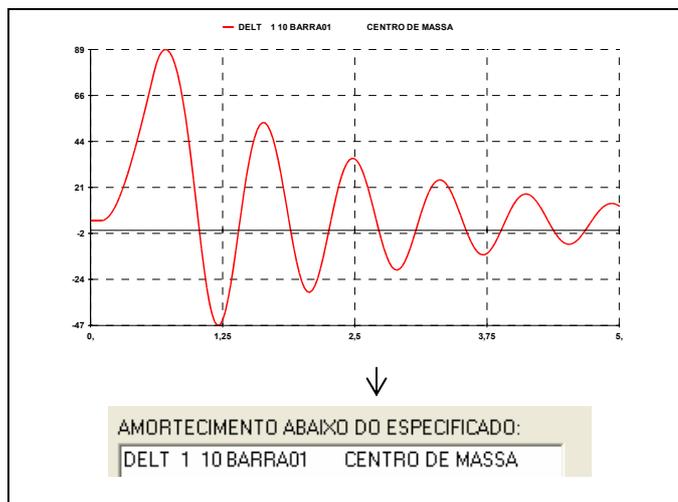


Figura 3 – Monitoração de amortecimento

## 5.0 - TECNOLOGIAS EXTRAS

Este tópico extra, a título de informação, ilustra mais uma funcionalidade do AVALie.

Baseado na dissertação de mestrado (1), que propõe a detecção de limites de estabilidade na simulação passo a passo, com base nas idéias oriundas dos chamados Métodos Diretos, foi implementado no AVALie uma ferramenta adicional para análise dos limites de estabilidade.

Uma das limitações da simulação passo a passo é a ausência de resultados diretos que informem o grau de estabilidade ou instabilidade. Os chamados Métodos Diretos de resolução contornam este empecilho, fornecendo uma margem ou limite de estabilidade, no sentido de informar o quão estável ou instável é o sistema frente a um dado defeito, porém, os Métodos Diretos ainda não se mostraram amplamente aplicáveis e confiáveis, além de possuir carência quanto a modelagem do sistema.

Com base na análise realizada em (1) observa-se que dentre os Métodos Diretos, os mais promissores são aqueles híbridos, ou seja, que utilizam a simulação por integração numérica. Um destes métodos, baseado na equivalência entre um sistema multimáquinas e um sistema máquina – barra infinita, tem se mostrado atraente e, assim, foi incorporado no AVALie. Este método parte da proposição de que o sistema sob determinada perturbação severa pode ser visto como dois grupos de máquinas, as críticas, aquelas que seriam responsáveis pela perda de sincronismo do sistema, e remanescentes. Estes dois grupos são equivalentados em duas máquinas e, então é realizada uma análise do comportamento destas, utilizando inclusive o clássico Critério das Áreas Iguais, para determinação de margens de estabilidade e tempo crítico de eliminação de falta.

## 6.0 - CONCLUSÕES

A complexidade dos sistemas de potência, aliado a um ambiente onde cada vez mais o sistema opere próximo dos seus limites de carregamento, torna evidente a necessidade de se desenvolver novas e melhores tecnologias para que o sistema possa ser analisado de uma forma transparente, segura e confiável.

A aplicação de programas auxiliares para a facilitação de análises é uma excelente idéia a qual pode trazer benefícios, dentre os quais:

- Redução do tempo de análise;
- Automatização de processos;
- Transparência;
- Segurança;

Assim, é altamente recomendada a utilização de aplicativos para a facilitação da análise de massa de resultados provenientes de programas de análise de sistema elétricos.

Espera-se que a proposta específica do programa apresentado possa ser útil na aplicação em diversas áreas, para avaliação de regime transitório, proporcionando facilidade em estudos de planejamento, segurança dinâmica, determinação de tempo crítico, confiabilidade, avaliação de novas tecnologias em controladores, classificação de contingências, etc.

Ressalta-se que a avaliação por programas auxiliares não pretende deixar de lado a análise mais minuciosa, mas dar um indicativo forte sobre a “saúde” do sistema e minimizar, em muito, a quantidades de averiguações.

## 7.0 - AGRADECIMENTOS

O autor demonstra seu reconhecimento e agradece aos engenheiros Waschington Fernandes Alves e Márcio Goldenberg Sereno, idealizadores do programa de avaliação. À Eletrobrás pelo apoio e incentivo.

## 8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) Lopes, C. E. V. M., (2006). Desempenho Transitório de Sistemas Elétricos de Potência no Domínio do Tempo com Informação de Margem de Estabilidade, Dissertação de Mestrado, COPPE / Universidade Federal do Rio de Janeiro, Junho 2006.

(2) CEPEL, (2005) Programa ANATEM Análise de Transitórios Eletromecânicos Manual do Usuário, V9, Março 2005.

## 9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Carlos Eduardo Vieira de Mendonça Lopes

Nascido em São Gonçalo, RJ em 11 de dezembro de 1979.

Mestrado (2006): COPPE/UFRJ e Graduação (2001) em Engenharia Elétrica: UFF

Empresas: CEPEL – Centro de Pesquisas em Energia Elétrica (2001 a 2003)

ELETROBRÁS – Centrais Elétricas Brasileiras, desde 2003.

Engenheiro da Divisão de Estudos de Elétricos do Departamento de Transmissão de Energia Elétrica.