

NOVAS FACILIDADES GRÁFICAS DO PROGRAMA ANATEM

Raquel Soares Sgarbi

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovado por:

Prof. Sebastião Ércules Melo Oliveira, D.Sc.
(Orientador)

Prof. Sergio Sami Hazan, Ph.D.

Prof. Jorge Luiz do Nascimento, Dr.Eng.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
JANEIRO DE 2010

Aos meus pais Jorge e Magali
Aos meus irmãos Rafael e Rodrigo

Agradecimentos

Agradeço a Deus por ter me guiado nesses anos de muita luta, estudo e alegria que vivenciei no decorrer da graduação.

Aos meus pais, Jorge e Magali, por acreditarem que eu tinha capacidade de conseguir uma vaga nesta faculdade tão desejada, e com isso, me incentivaram a não desistir. Agradeço a minha mãe, por abrir mão de sua carreira para nos criar e educar. Ao meu pai, que sempre fez o que pôde para oferecer sempre o melhor a nós.

Aos meus irmãos, Rafael e Rodrigo, pelo apoio que recebo nos principais momentos da minha vida e pelo companheirismo. Sabemos que nós três somos motivos de muito orgulho!

Aos meus tios, primos, avós e amigos de quem algumas vezes me privei da presença devido aos estudos. Obrigada pela força e por sempre torcerem por mim! Em especial, a minha avó Deoclecina, que, infelizmente, não está presente neste momento de felicidade da sua única neta.

Ao Eduardo pelo amor, carinho e compreensão que tivemos no decorrer da faculdade. Muito obrigada pelo apoio e pelas horas de estudos, e por ter me ajudado muito na minha formação acadêmica e profissional.

A todos amigos que conquistei no decorrer da faculdade, por todos os momentos de estudos e confraternizações que tivemos. Com certeza, sem vocês a faculdade não teria a menor graça.

Ao professor Alessandro Manzoni, que foi o idealizador deste projeto e que infelizmente não está mais, fisicamente, entre nós. Obrigada pela orientação e apoio na realização deste trabalho e pela qualidade de suas aulas. Com essa perda, inesperada, a faculdade perdeu um profissional de excelente qualidade, autor de inúmeros projetos.

Aos professores, técnicos e funcionários do departamento que se dedicam e fazem com que a UFRJ seja uma das melhores faculdades do Brasil. Um agradecimento especial ao professor Sebastião Ércules Melo Oliveira, que abraçou o meu projeto como orientador “substituto” e aos professores Jorge Luiz do Nascimento e Sergio Sami Hazan, pelo apoio e composição da banca examinadora.

"O homem se torna muitas vezes o que ele próprio acredita que é. Se insisto em repetir para mim mesmo que não posso fazer uma determinada coisa, é possível que acabe me tornando realmente incapaz de fazê-la. Ao contrário, se tenho a convicção de que posso fazê-la, certamente adquirirei a capacidade de realizá-la, mesmo que não a tenha no começo."
Mahatma Gandhi

Resumo

Este trabalho consiste na análise de uma ferramenta muito utilizada em Sistemas Elétricos de Potência, o programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos (ANATEM) que foi desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica da Eletrobrás – CEPEL. O ANATEM é uma aplicação computacional que visa o estudo da estabilidade transitória em sistemas de potência.

É cada vez mais inviável a análise ou estudo de um sistema elétrico de médio ou grande porte sem o uso de programas computacionais, devido ao tamanho e complexidade dos sistemas atuais. E muitos dos programas que foram desenvolvidos pelo CEPEL são amplamente utilizados pelas principais empresas do setor elétrico nacional.

Com isso, o Centro de Pesquisa da Eletrobrás está sempre empenhado no desenvolvimento de novas versões dos programas de sua autoria, com o intuito de oferecer ao usuário uma ferramenta de melhor qualidade e facilidade.

Como já foi mencionado, para o proposto trabalho, será dada ênfase ao ANATEM que tem como foco principal a simulação no domínio do tempo, à frequência fundamental, para a análise dinâmica do sistema em questão. A versão mais atual (V10.04.01), que foi disposta no mês de maio de 2009, inclui diversas facilidades, entre as quais: um ambiente gráfico mais adequado ao Windows, que visa proporcionar maior eficiência na sua utilização.

O objetivo deste trabalho é fazer uma avaliação destas novas facilidades, mas sob o ponto de vista do usuário, analisando os pontos fortes e fracos das interfaces gráficas e, por fim, sugerir melhorias na versão mais atual.

Índice

1. Introdução	1
1.1 Motivações e objetivos	2
1.2 Estrutura geral do texto	2
2. Estabilidade Transitória	4
2.1 Aspectos gerais	4
2.2 Classificação e conceitos básicos	5
3. O programa ANATEM	7
3.1 Aspectos gerais e histórico	7
3.2 Características do programa	9
3.2.1 Método de solução utilizado	11
3.2.2 Método de integração para equações diferenciais	12
3.2.3 Método de solução para equações algébricas da rede CA	13
3.3 Representação dos elementos do sistema	14
3.3.1 Circuitos	14
3.3.2 Cargas	15
3.3.3 Geradores	16
3.3.4 Controles	16
3.4 Controladores definidos pelo usuário (CDU)	17
3.4.1 Idéia básica	17
3.4.2 Blocos disponíveis	17
3.4.3 Linguagem de modelagem	18
3.4.4 Exemplo	19
3.5 Módulo base (MS-DOS)	21
3.5.1 Ambiente	21
3.5.2 Unidades lógicas	22
3.5.3 Arquivos plt	23
3.5.4 Exemplo	24
4. Novas melhorias no programa ANATEM	31
4.1 Interface gráfica iANATEM	31
4.1.1 Ambiente	31
4.1.2 Editor de dados	32
4.1.3 Exemplo	36
4.2 Visualização dos resultados – curvas na Plot CEPEL	41

4.2.1	<i>Ambiente e facilidades</i>	41
4.3	<i>CDU Edit</i>	45
4.3.1	<i>Ambiente</i>	45
4.3.2	<i>Forma de operação</i>	46
4.3.3	<i>Exemplo de construção de um CDU</i>	47
4.3.4	<i>Exportar/Importar para o arquivo de CDUs</i>	50
5.	<i>Conclusões e Sugestões</i>	53
	<i>Referências Bibliográficas</i>	56

Índice de Tabelas

<i>Tabela 3.1 – Formato dos dados de blocos do CDU [5]</i>	21
<i>Tabela 3.2 – Descrição das Unidades Lógicas [5]</i>	23

Índice de Figuras

<i>Figura 3.1 – Fluxograma geral de solução [5]</i>	10
<i>Figura 3.2 – Processo interativo de solução [5]</i>	11
<i>Figura 3.3 – Sistema exemplo de 45 barras</i>	19
<i>Figura 3.4 – Dados de um CDU</i>	20
<i>Figura 3.5 – Tela principal do ANATEM</i>	22
<i>Figura 3.6 – Arquivo em stb do sistema exemplo</i>	25
<i>Figura 3.7 – Dados do distúrbio e da simulação</i>	26
<i>Figura 3.8 – Tensão na barra em que o curto foi aplicado</i>	26
<i>Figura 3.9 – Tensão em cinco barras distintas</i>	27
<i>Figura 3.10 – Ângulo do eixo q de cinco barras distintas</i>	28
<i>Figura 3.11 – Frequência do gerador</i>	28
<i>Figura 3.12 – Potência elétrica</i>	29
<i>Figura 3.13 – Potência mecânica</i>	29
<i>Figura 4.1 – Comunicação entre os processos [1]</i>	32
<i>Figura 4.2 – Arquivo Padronizado</i>	33
<i>Figura 4.3 – (a) Inserção da régua; (b) Linha correspondente ao código que foi inserida</i>	34
<i>Figura 4.4 – (a) Editor de arquivos antigo; (b) Editor de arquivos atual</i>	35
<i>Figura 4.5 – Exemplo de janela de dica</i>	35
<i>Figura 4.6 – Dados do evento</i>	36
<i>Figura 4.7 – Tensão na barra que foi aplicado o curto</i>	37
<i>Figura 4.8 – Tensão em cinco barras distintas</i>	37
<i>Figura 4.9 – Potência Elétrica</i>	38
<i>Figura 4.10 – Dados do evento</i>	38
<i>Figura 4.11 – Tensão de campo da máquina (Efd) na barra Itauba</i>	39
<i>Figura 4.12 – Tensão na barra Itauba</i>	39
<i>Figura 4.13 – Janela de escolha dos gráficos</i>	40
<i>Figura 4.14 – Variáveis disponíveis para plotagem</i>	41
<i>Figura 4.15 – Janela de opções de simulação</i>	42
<i>Figura 4.16 – Menu Simulação com a opção Executar</i>	42
<i>Figura 4.17 – Janela de diálogo com o tempo de simulação</i>	43
<i>Figura 4.18 – Arquivos texto de saída</i>	44
<i>Figura 4.19 – Comparação com alguns gráficos</i>	44
<i>Figura 4.20 – Barra de seleção e área de trabalho do CDUEdit</i>	46
<i>Figura 4.21 – Diagrama de blocos do controlador 1 do exemplo</i>	47
<i>Figura 4.22 – Barra de seleção e área de trabalho do CDUEdit</i>	47
<i>Figura 4.23 – Edição de DEFVAL</i>	48
<i>Figura 4.24 – Edição e inclusão de parâmetros</i>	49
<i>Figura 4.25 – Edição de variáveis</i>	49
<i>Figura 4.26 – (a) Arquivo de extensão cdu gerado pela opção Exportar ANATEM; (b) Arquivo de extensão cdu criado pela versão antiga</i>	50
<i>Figura 4.27 – Importando arquivos do ANATEM</i>	51
<i>Figura 4.28 – Controlador número 1 importado do ANATEM</i>	52

Capítulo 1

Introdução

Está se tornando cada vez mais necessário o uso de ferramentas computacionais para se fazer análise ou estudo de um sistema elétrico. Em se tratando de um sistema de médio ou grande porte esta dependência é mais evidente, devido a complexidade do mesmo.

Os programas desenvolvidos pelo CEPEL estão em constantes testes e atualizações, o que faz com que sejam utilizados pelas principais empresas do Sistema Elétrico Brasileiro. Dentre os principais programas podemos citar: ANAREDE (Análise de Rede), ANAFAS (Análise de Falhas Simultâneas), ANATEM (Análise de Transitórios Eletromecânicos) e FLUPOT (Fluxo de Potência Ótimo), ferramentas utilizadas nas disciplinas de Análise de Sistema de Potência e Análise de Defeitos em Sistemas de Potência, oferecidas no curso de Engenharia Elétrica da UFRJ.

Nos últimos anos pesquisadores do CEPEL vêm concentrado esforços para atualizar os seus principais programas de maneira a atender um antigo pedido dos usuários, o desenvolvimento de um ambiente gráfico adequado às facilidades do sistema operacional Windows. Para o trabalho em questão, serão abordados as novas funcionalidades trazidas com a interface do ANATEM e o programa de criação de Controladores Definidos pelos Usuários (CDU).

Em conjunto com os programas tradicionais para análise do sistema elétrico, o CEPEL criou programas auxiliares para o tratamento e apresentação dos resultados através de gráficos e relatórios, permitindo o aumento da eficiência e da produtividade dos usuários. Com isso, em maio de 2009, o CEPEL disponibilizou aos usuários uma nova versão do programa para Análise de Transitórios Eletromecânicos. Esta incorpora vários módulos dotados de interface gráfica que funcionam em conjunto. São eles: o próprio ANATEM (módulo principal, gerencia os dados de entrada, relatórios e os outros módulos), Plot CEPEL (módulo de gerenciamento dos gráficos) e CDUEdit (módulo para projeto de dispositivos definidos pelo usuário) [1].

1.1 Motivações e objetivos

A demanda de energia, que está em constante crescimento, apesar do pouco investimento, a reestruturação do setor elétrico, o aumento das cargas e as perturbações em sistemas elétricos são fatores que contribuem para a operação dos sistemas bem próximo do seu limite de estabilidade, comprometendo assim certos critérios de segurança. Com isso, se torna muito importante avaliar o quanto perto ou distante o sistema está operando deste limite.

Devido à grande funcionalidade de tais programas já citados, se faz necessário uma análise da nova versão disponível, uma vez que nela se encontram ferramentas que antes não existiam no programa e que são de suma importância em Sistemas de Potência.

Este trabalho tem por objetivo estudar, sob o ponto de vista do usuário, as novas facilidades gráficas que foram introduzidas na versão mais recente do programa ANATEM (V10.04.01).

Ao longo do trabalho serão destacados os pontos fortes e fracos encontrados no programa, com o intuito de ao final serem feitas sugestões de melhorias da interface gráfica atual.

1.2 Estrutura geral do texto

O Capítulo II tem por finalidade apresentar uma revisão sobre estabilidade transitória, destacando os aspectos gerais, conceitos básicos e a classificação. Em seguida é realizada uma formulação do problema, mostrando os esquemas de solução e os métodos de integração para o caso do estudo de estabilidade transitória.

No Capítulo III é feita uma análise do programa em si. Primeiramente são destacados o histórico e os aspectos gerais do ANATEM. Na sequência são abordadas as características do programa, tais como o método de solução e integração utilizado e a solução de equações algébricas. É apresentado um pequeno resumo da representação dos principais elementos de um sistema no programa. O capítulo possui um tópico sobre os controladores definidos pelo usuário (CDU) com a idéia básica dos mesmos. E, por fim, é tratado o modelo base do programa, ou seja, aquele em MS-DOS.

O Capítulo IV traz as novas facilidades gráficas do programa. Neste são mostrados as novas ferramentas que foram criadas nesta interface, indicando o quanto esta nova versão trouxe de novas opções. É abordado também a visualização dos resultados, através do PlotCEPEL e, para finalizar o capítulo, é mostrado a grande ferramenta que agora foi introduzida, o editor de CDU.

Por fim, no Capítulo V, são feitas as considerações finais e uma análise geral do programa, destacando-se os seus pontos fortes e fracos e dando sugestões de melhorias.

Capítulo 2

Estabilidade Transitória

2.1 Aspectos gerais

É de fundamental importância se ter conhecimento do comportamento dinâmico de máquinas em sistemas elétricos, para o desempenho global e continuidade do fornecimento de potência. O sucesso da operação de um Sistema Elétrico de Potência depende da habilidade de várias máquinas síncronas manterem sincronismo em condições transitórias que podem ser criadas por diferentes distúrbios [2].

O estudo do comportamento transitório das máquinas síncronas envolve tanto o fenômeno elétrico quanto o mecânico. O primeiro relaciona fluxos e correntes, enquanto o segundo descreve as variações da velocidade do eixo e dos ângulos do rotor.

Na publicação “American Standard Definitions of Electrical Terms” da “American Institute of Electrical”, as definições de estabilidade e o limite de estabilidade são as seguintes:

Estabilidade – quando usado com referência a um sistema de potência, é o atributo do sistema, ou de parte do sistema, que lhe permite desenvolver em seus elementos forças restauradoras iguais ou maiores que as forças perturbadoras, que permitem estabelecer um novo estado de equilíbrio.

Limite de estabilidade – é o máximo fluxo possível de energia que pode passar por um ponto particular do sistema, quando todo ele ou a parte a que se refere o limite de estabilidade está funcionando de maneira estável.

Há dois tipos de instabilidade: perda de sincronismo, que é um fenômeno de instabilidade angular (posição angular do rotor) e colapso de tensão, que é o caso de instabilidade de tensão.

Este capítulo tem por finalidade apresentar uma revisão de estabilidade transitória, visto que para o estudo em questão estamos interessados na análise de um sistema submetido a grandes perturbações, já que o programa ANATEM faz a análise de transitórios eletromecânicos.

2.2 Classificação e conceitos básicos

Quanto aos tipos de perturbações temos as grandes, que são os casos de curtos-circuitos, variação brusca de velocidade, perda de geradores ou então perda de linha. Já as pequenas são consideradas aquelas variações nominais da carga, por exemplo, ao se ligar uma carga nova ou desligar alguma já existente.

O termo “Estabilidade Transitória” está relacionado a fenômenos que se seguem à ocorrência de uma grande e súbita perturbação em um sistema de potência. E, segundo o IEEE [3], diz-se que um sistema é estável sob o ponto de vista da estabilidade transitória quando este, após sofrer uma grande perturbação, é capaz de alcançar uma condição de operação aceitável.

Os estudos de estabilidade transitória analisam o comportamento dos sistemas após perturbações de grande impacto e se o sistema será capaz de encontrar um novo ponto de operação após o impacto, e quais os procedimentos necessários para que isso aconteça. A preocupação principal destes estudos é verificar a manutenção do sincronismo entre as máquinas, em um pequeno intervalo de tempo, após acontecer a perturbação.

Um sistema é dito transitoriamente estável quando, após a eliminação do defeito, ele consegue achar um ponto de operação estável. Para se garantir a estabilidade, é necessário que a atuação no sistema de forma a isolar o defeito deva ser feita rapidamente. Tempo crítico de abertura é o tempo máximo em que o isolamento do defeito deva ser realizado, tal que o sistema continue estável. Assim, quando a eliminação do defeito ocorre antes do tempo crítico o sistema será estável, enquanto que se ela ocorrer depois deste tempo, ele se torna instável. De forma resumida, podemos dizer que se o tempo de eliminação do defeito ($t_{abertura}$) for maior que o tempo crítico, o sistema será instável.

O estudo de problemas de estabilidade de sistemas de potência relacionado aos efeitos de perturbações de pequenas amplitudes pode ser feito a partir do uso de modelos linearizados, o que permite a utilização de ferramentas da teoria de sistemas lineares. Mas para o caso de um sistema submetido a grandes perturbações, como a perda de uma linha ou um curto-circuito em alguma barra ou linha, as não-linearidades devem ser consideradas e evidentemente que o modelo matemático é formado por um conjunto de equações diferenciais não-lineares. Com isso, para este caso, faz-se necessário o uso de modelos não-lineares para

as máquinas e para os outros equipamentos que estiverem presentes no sistema na análise dos problemas de estabilidade transitória.

Para o caso de sistemas mais simples formados, por exemplo, de um gerador conectado a barra infinita, podemos utilizar um método derivado de uma interpretação gráfica do problema de estabilidade transitória, conhecido como Critério das Áreas Iguais. Esta é uma técnica gráfica de análise que permite um excelente entendimento dos fenômenos físicos envolvidos nos problemas de estabilidade transitória.

Mas, para uma situação mais geral do estudo de efeitos de sistemas com várias máquinas e que estão submetidos a grandes distúrbios, o critério acima não é viável. Para estes casos é necessário que sejam utilizados métodos quantitativos para a análise do problema. Estes métodos são baseados na integração numérica das equações diferenciais não-lineares que modelam o sistema.

Capítulo 3

O programa ANATEM

3.1 Aspectos gerais e histórico

Empresas do setor elétrico devem enfrentar o desafio da operação dos sistemas interligados próximos aos seus limites de estabilidade devido aos custos crescente de construção de novas usinas geradoras e ainda de aquisição de faixas de passagem para a implementação de sistemas de transmissão conectando estas instalações de geração aos centros de carga [4].

O ANATEM é uma ferramenta para a realização de simulações do desempenho dinâmico dos Sistemas Elétricos de Potência, que é utilizado por empresas do setor elétrico em estudos tanto de operação como de planejamento. O programa é uma aplicação computacional para a realização de estudos de estabilidade à frequência fundamental.

Ele possui peculiaridades avançadas de modelagem e facilidade de implementação de sistemas de controle definidos pelo usuário por meio de diagramas de blocos com as funções de transferência representadas no domínio da frequência.

É uma ferramenta que oferece ao setor fatores importantes como eficiência, métodos numéricos, precisão, técnicas de programação e modularidade que estão devidamente explorados e conjugados com as particularidades do sistema brasileiro. O programa é resultado de um esforço do CEPEL com o objetivo de dar continuidade à capacitação tecnológica em desenvolvimento de aplicações computacionais na área de dinâmica de sistemas de energia elétrica [5].

O programa fornece a resposta frente a uma sequência de perturbações, seja ela de pequena ou grande magnitude, seguida por operações de abertura e religamento de circuitos de transmissão. O desligamento de outros elementos também pode ser considerado. Os módulos que compõem o ANATEM foram codificados em FORTRAN e a capacidade do programa é definida através de um arquivo de parâmetros que facilita o seu redimensionamento de acordo com as necessidades e instalações computacionais específicas de cada usuário.

Efetivamente pode ser utilizado nas seguintes aplicações:

1. Avaliação da estabilidade transitória e dinâmica do sistema elétrico frente a contingências simples ou múltiplas;
2. Determinação de limites operativos como, por exemplo, máxima transferência de potência entre áreas;
3. Desempenho dinâmico de Esquemas de Controle de Emergência e de Esquemas de Controle de Segurança;
4. Análise de desempenho de sistemas de controle nas oscilações de caráter local ou interáreas;
5. Análise de colapso de tensão, por incremento dinâmico do carregamento;
6. Testes de comissionamento de equipamentos.

As facilidades de saída do programa durante a solução incluem uma relação de defeitos e manobras, estabelecidas ou que possam vir a ocorrer, além de um relatório para um conjunto de grandezas elétricas no domínio do tempo que são previamente escolhidas pelo usuário. Um relatório final de resultados na tela ou na forma de impressão, em formato de tabela ou saída gráfica, é emitido após a realização da simulação.

Nos próximos parágrafos serão destacados um histórico com as principais alterações das versões do programa, a partir da versão V10.00.00. Nesta versão foi alterado o programa para considerar o aumento dos seguintes campos de dados:

- número de barra CA – de 4 para 5 dígitos
- número de área – de 2 para 3 dígitos
- identificação de grupo base de tensão – de 1 para 2 dígitos
- identificação de grupo limite de tensão – de 4 para 6 dígitos

Além disso, todos os arquivos de dados do ANATEM já existentes deverão ser convertidos para o novo formato usando-se o programa CONVFORM.EXE que está disponível na instalação do ANATEM.

Em seguida, com a versão V10.01.00 foi feita a compatibilização do programa com a nova interface gráfica de execução. A nova interface do ANATEM (iANATEM V1.0.0) edita arquivos de dados, dispara o ANATEM para execução de casos, visualiza arquivos-texto de resultados e dispara o programa PLOTCEPEL para plotagem dos resultados. Possui ainda

ajuda "on-line" tanto para a interface quanto para os códigos de execução do ANATEM. Se o usuário preferir, o programa ainda pode ser executado da maneira tradicional, via linha de comando em janela DOS, sem o uso da interface.

Na V10.03.00 é possível disparar casos para a execução em batch em paralelo, com a nova versão da interface do ANATEM (iANATEM V1.3.0), desde que o computador possua mais de um processador/núcleo. Também foi aumentado o número máximo de barras CA para 10.000 e o número máximo de circuitos CA para 20.000. Outras estruturas de dados relacionadas a estas tiveram dimensão aumentada proporcionalmente.

Por fim, na versão V10.04.00, foi criado o Código de Execução DFLA para cálculo de fluxos ativo e reativo líquidos de intercâmbio de área. É fornecida uma lista de circuitos de intercâmbio (para cada área) cujos fluxos nas extremidades especificadas serão usados para a contabilização dos fluxos líquidos.

3.2 Características do programa

Para a simulação de transitórios eletromecânicos, temos um problema: obter a solução do conjunto de equações algébrico-diferenciais que descreve o comportamento das máquinas síncronas, dos equipamentos e das redes elétricas.

Utiliza-se o método de integração trapezoidal implícito para a solução das equações devido a sua simplicidade de implementação, a generalidade e estabilidade numérica. Os métodos implícitos em geral, como é o caso deste método, é numericamente estável, o que evita acumulação de erros de truncamento a cada passo de integração, fato comum em métodos implícitos do tipo Runge-Kutta [4].

Os fluxogramas das Figuras 3.1 e 3.2 descrevem o esquema de solução utilizado pelo ANATEM. O esquema utilizado é o alternado implícito, onde o sistema de equações diferenciais é algebrizado usando um método de integração implícito e resolvido alternadamente com as equações algébricas da rede CA (representada pela sua matriz Y_{barra} e injeções de corrente devidas a componentes não lineares) até a convergência.

O processo iterativo permite eliminar os erros de interface entre os dois sistemas de equações. Quando há transmissão em corrente contínua as equações de controle dos

conversores e as equações relativas à rede CC são resolvidas também separadamente, o que introduz outros laços de iteração (Figura 3.2) [4].

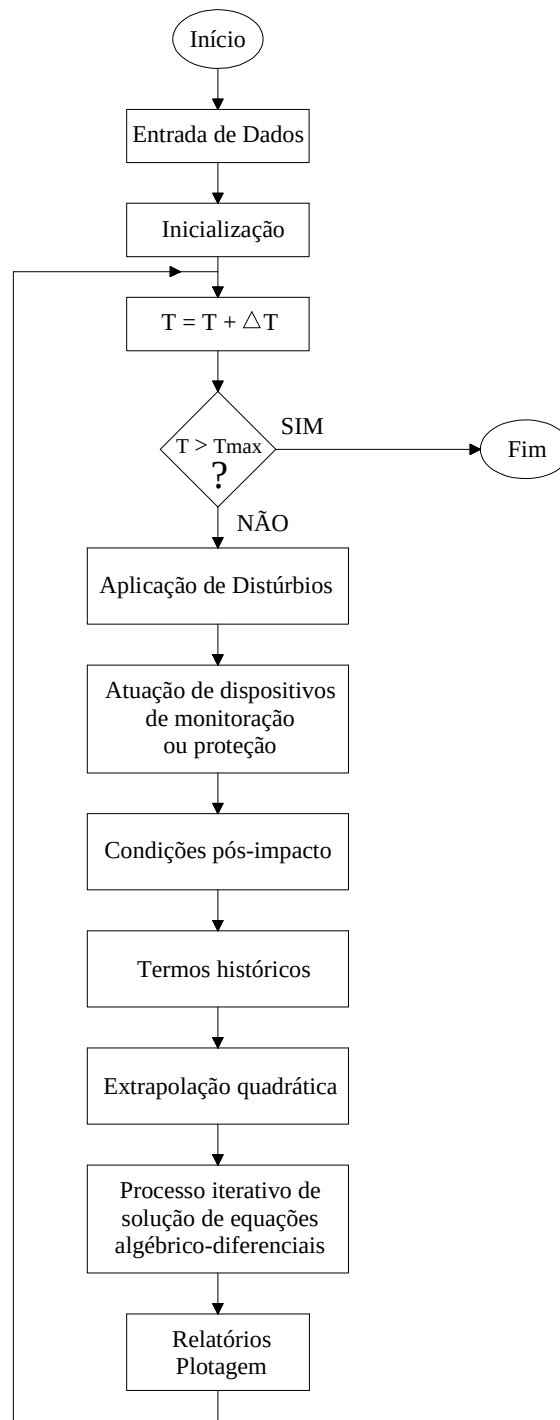


Figura 3.1 – Fluxograma geral de solução [5]

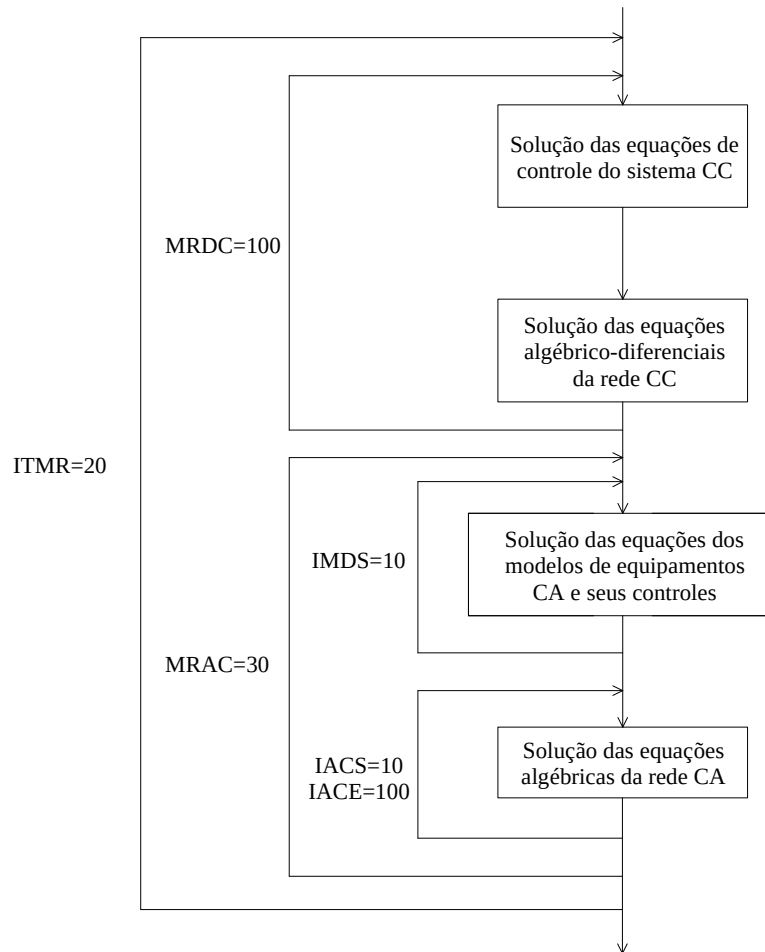


Figura 3.2 – Processo iterativo de solução [5]

Utiliza-se o método direto com formulação nodal usando decomposição LDU esparsa para as soluções das redes CA e CC. Na solução, consideram-se as cargas não-lineares, os transformadores defasadores, os compensadores estáticos e os motores de indução presentes na rede CA, através de injeções de corrente. Na presença destes elementos a solução da rede CA é necessariamente iterativa [4].

3.2.1 Método de solução utilizado

A resolução do conjunto de equações algébrico-diferenciais não lineares que descrevem o comportamento dinâmico do sistema é uma análise não linear no domínio do tempo. Por causa da não linearidade destas equações elas não podem ser resolvidas

explicitamente. Para a resolução delas utilizam-se os métodos conhecidos como “passo a passo”, como os métodos de integração numérica, recorrendo-se ao uso da simulação digital. Euler, Runge-Kutta, trapezoidal, entre outros, são alguns dos métodos que podem ser aplicados.

Uma modelagem mais detalhada de geradores e equipamentos que influenciam na estabilidade se faz necessário para uma análise mais confiável do desempenho dinâmico de sistemas de potência reais, com estruturas complexas de redes. Com isso, o método de avaliação mais preciso e aplicável na avaliação da estabilidade transitória é a simulação no domínio do tempo, de forma que as equações diferenciais são resolvidas por técnicas de integração numérica.

Por se basear na integração numérica das equações diferenciais que descrevem o comportamento dinâmico do sistema, este método de avaliação da estabilidade não possui nenhum tipo de restrição quanto à modelagem dos componentes e controles do sistema. Só é necessário apenas, o que não é tão fácil, estabelecer os modelos mais representativos para o estudo em questão e definir e aplicar métodos para obtenção dos parâmetros a serem utilizados na descrição dos modelos referidos.

O uso dos computadores é fundamental para este método de avaliação de estabilidade transitória. Normalmente os programas desenvolvidos fornecem curvas indicando o comportamento das variáveis do sistema ao longo do tempo. Estes programas, por sua vez, não se limitam apenas à determinação de algumas variáveis, como os ângulos dos rotores das máquinas ao longo do tempo, mas de uma série de outras grandezas associadas ao efeito global sobre o sistema, constituindo estes programas ferramentas valiosas para uma análise completa da estabilidade [6].

3.2.2 Método de integração para equações diferenciais

Como já foi mencionado, o programa utiliza o método trapezoidal implícito para algebrização das equações diferenciais. A formulação básica está definida em [5], e mostrada a seguir para uma equação diferencial de primeira ordem:

$$\dot{x} + ax = v$$

$$\int_{t-\Delta t}^t dx + \int_{t-\Delta t}^t ax dt = \int_{t-\Delta t}^t v dt$$

$$x_{(t)} - x_{(t-\Delta t)} + a \cdot \frac{\Delta t}{2} (x_{(t)} + x_{(t-\Delta t)}) = \frac{\Delta t}{2} \cdot (v_{(t)} + v_{(t-\Delta t)})$$

$$x_{(t)} = B_{(t-\Delta t)} + \frac{\frac{\Delta t}{2}}{1 + a \cdot \frac{\Delta t}{2}} \cdot v_{(t)}$$

onde:

$$B_{(t-\Delta t)} = \frac{1 - a \cdot \frac{\Delta t}{2}}{1 + a \cdot \frac{\Delta t}{2}} \cdot x_{(t-\Delta t)} + \frac{\frac{\Delta t}{2}}{1 + a \cdot \frac{\Delta t}{2}} \cdot v_{(t-\Delta t)}$$

3.2.3 Método de solução para equações algébricas da rede CA

É utilizado o método direto de solução de sistemas lineares usando fatoração LU em sistemas esparsos de matrizes simétricas. O sistema linear que descreve a rede CA é do seguinte tipo:

$$[Y_{\text{barra}}] [V] = [I]$$

onde: $[V]$ é o vetor de tensões nodais;

$[I]$ é o vetor de correntes injetadas nos nós;

$[Y_{\text{barra}}]$ é a matriz de admitância nodal.

Se houver cargas funcionais ou outros elementos não - lineares (como conversores CA-CC, compensadores estáticos, motores de indução, etc) as correntes destes elementos são

consideradas no vetor $[I]$ e a solução de rede será necessariamente iterativa, pois estas correntes dependem do vetor de tensões $[V]$ a ser calculado [5].

As barras de geração consideradas como barras infinitas (tensão e frequência constantes) têm as variáveis correspondentes eliminadas do sistema, sendo suas contribuições incluídas no termo independente à direita da igualdade do sistema:

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{|c|c|} \hline Y_{11} & Y_{12} \\ \hline Y_{21} & Y_{22} \\ \hline \end{array}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \begin{array}{|c|} \hline V_1 \\ \hline \end{array} \\
 = \\
 \begin{array}{|c|} \hline V_2 \\ \hline \end{array}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \begin{array}{|c|} \hline I_1 \\ \hline \end{array} \\
 = \\
 \begin{array}{|c|} \hline I_2 \\ \hline \end{array}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 V_1 : \text{tensões desconhecidas} \\
 V_2 : \text{tensões conhecidas}
 \end{array}$$

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{|c|} \hline \begin{array}{c} \text{Matriz de admittâncias} \\ \text{com barras de geração} \end{array} \\ \hline \end{array}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \begin{array}{|c|} \hline V_1 \\ \hline \end{array} \\
 = \\
 \begin{array}{|c|} \hline V_2 \\ \hline \end{array}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \begin{array}{|c|} \hline I \\ \hline \end{array}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \text{Após fatora\c{c}\~ao}
 \end{array}$$

3.3 Representação dos elementos do sistema

Nesta seção será analisada a representação de alguns dos elementos no ANATEM.

3.3.1 Circuitos

Linhas de transmissão, transformadores e transformadores defasadores são representados pelos seus circuitos π equivalentes. Estes elementos podem ser ligados ou desligados a qualquer momento pelo usuário.

3.3.2 Cargas

As cargas estáticas modeladas no programa ANAREDE (programa de análise de fluxo de potência) na forma usual como potência constante são convertidas em cargas do tipo impedância constante, enquanto que as definidas por uma representação quadrática que traduz as parcelas de potência, corrente e impedância constante, mantêm a sua característica original.

Com isso, o comportamento das cargas estáticas é descrito pelas equações a seguir:

$$\text{Carga Ativa} = \begin{cases} \left[(100 - A - B) + A \cdot \left(\frac{V}{V_0} \right) + B \cdot \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right] \cdot \frac{P}{100} & \text{se } V \geq V_{fld} \\ \left[(100 - A - B) \cdot \left(\frac{V}{V_{fld}} \right)^2 + A \cdot \left(\frac{V}{V_0} \right) \cdot \left(\frac{V}{V_{fld}} \right) + B \cdot \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right] \cdot \frac{P}{100} & \text{se } V < V_{fld} \end{cases}$$

$$\text{Carga Reativa} = \begin{cases} \left[(100 - C - D) + C \cdot \left(\frac{V}{V_0} \right) + D \cdot \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right] \cdot \frac{Q}{100} & \text{se } V \geq V_{fld} \\ \left[(100 - C - D) \cdot \left(\frac{V}{V_{fld}} \right)^2 + C \cdot \left(\frac{V}{V_0} \right) \cdot \left(\frac{V}{V_{fld}} \right) + D \cdot \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right] \cdot \frac{Q}{100} & \text{se } V < V_{fld} \end{cases}$$

onde: A , C e B , D são parâmetros que definem as parcelas de carga representadas por corrente e impedância constantes, respectivamente;

P e Q são as potências ativa e reativa da carga para a tensão V_0 ;

V_0 é a tensão inicial da barra, calculada pelo fluxo de potência;

V_{fld} é a tensão abaixo da qual a carga passa a ser modelada como impedância constante.

Em $t = 0$ as cargas definidas no ANAREDE são automaticamente convertidas para impedância constante ($A = C = 0$ e $B = D = 100$).

3.3.3 Geradores

Podem ser representados três diferentes modelos pré-definidos no programa: modelo clássico (tensão constante atrás da reatância transitória de eixo direto), modelo de pólos salientes e modelo de rotor liso. A barra infinita é disponível também pelo modelo clássico.

Nestes dois últimos modelos é possível representar os efeitos da saturação, de duas maneiras diferentes. A correção pode ser definida a partir da componente de eixo de quadratura da tensão atrás da reatância transitória de eixo direto ou a partir da tensão de entreferro atrás da reatância de dispersão da armadura.

Cada unidade geradora tem seus dados na sua base nominal. A cada barra de geração definida no programa ANAREDE pode-se associar várias máquinas equivalentes (grupos de máquinas). Então uma usina é representada por geradores equivalentes, sendo estes constituídos por uma ou mais unidades geradoras iguais. Quando existir mais de um gerador equivalente em uma barra, torna-se necessário especificar os fatores de participação de cada um deles na geração total.

As máquinas não modeladas são automaticamente convertidas para impedâncias constantes.

3.3.4 Controles

O programa apresenta vinte e quatro modelos predefinidos para representação dos sistemas de regulação de tensão dos geradores. O regulador de tensão engloba as partes do sistema de controle e da excitatriz. Aqueles que não se enquadram nos modelos predefinidos do programa podem ser modelados através dos controladores definidos pelo usuário.

Já para reguladores de velocidade, o programa possui sete modelos predefinidos para representação dos sistemas de controle de velocidade e geradores. O regulador de velocidade engloba as partes do sistema de controle e da turbina. De forma similar, se o modelo desejado pelo usuário não fizer parte do programa, é possível representá-lo através dos CDUs.

O ANATEM dispõe de doze modelos de estabilizador aplicado em regulador de tensão. Aqueles que não se enquadrarem nos modelos predefinidos podem ser representados por CDU.

3.4 Controladores Definidos pelo Usuário (CDU)

3.4.1 Idéia básica

Um recurso do ANATEM que merece destaque é a capacidade de representar praticamente qualquer tipo de controle com o uso da funcionalidade do Controle Definido pelo Usuário (CDU). É uma ferramenta que dá flexibilidade para a definição de controladores genéricos e que é útil devido às contínuas mudanças nos equipamentos e à necessidade de novas estratégias de controle, pois fornece opções para a definição de controladores genéricos [4].

É possível definir modelos de controladores para as unidades de geração e modelos de compensadores estáticos e seus controladores pelo usuário. O modelo que o usuário vai definir pode ser linear ou não, representados através de diagrama de blocos.

3.4.2 Blocos disponíveis

No programa é oferecida uma grande variedade de blocos elementares, os quais podem ser conectados para modelagem de um controle de topologia complexa. Isto permite ao usuário criar controladores da forma que deseja. A seguir estão descritos os principais tipos de blocos, separados por suas funções:

- Blocos aritméticos: *soma*, *multpl*, *divsao*, *ganho* e *fracao*;
- Blocos dinâmicos e limitadores: *ledlag*, *pol(s)*, *proint*, *wshout*, *limita*, *lagnl* e *intres*;
- Blocos de interface: *export* e *import*;
- Blocos terminadores: *entrad* e *saída*;

- Blocos comparadores: *compar*, com os seguintes subtipos: *le* ($\leq$), *lt* ($<$), *gt* ($>$), *ge* ($\geq$), *eq* ($=$) e *ne* ($\neq$);
- Blocos de operadores lógicos: *logic*, com os seguintes subtipos: *and*, *or*, *xor*, *not*, *nand*, *nor*, *nxor* e *fflop1*;
- Blocos seletores: *max*, *min* e *selet2*;
- Bloco para atraso: *delay*;
- Blocos para amostragem e temporização: *t/hold*, *s/hold* e *acum*;
- Blocos para funções matemáticas:
 - Funções trigonométricas e angulares: *degree*, *radian*, *sin*, *cos*, etc
 - Funções envolvendo potências e logaritmos: *sqrt*, *exp*, *log*, *invrs*, etc
 - Funções para sinal: *menos*, *abs* e *sinal*
 - Funções para inteiros: *trunc* e *round*
 - Funções não-lineares em geral: *pulso*, *rampa*, *reta*, *steps*, etc

3.4.3 Linguagem de modelagem

Com o programa é possível modelar sistemas gerais de controle (lineares ou não-lineares), que podem possuir múltiplas entradas e saídas, utilizando uma linguagem de descrição baseada em diagrama de blocos no domínio da frequência usualmente empregada na teoria de sistemas de controle. A representação dos blocos é feita pela sua função de transferência de Laplace (blocos lineares) ou então pela função não linear que relaciona as entradas e as saídas no domínio do tempo.

Segundo [5] as regras básicas para construção e utilização de um CDU são as seguintes:

- As entidades básicas de um CDU são variáveis e blocos.
- Variáveis podem ser entradas, saídas ou limites de bloco.

- Toda variável que não é limite de bloco deve necessariamente ser entrada de um bloco e saída de outro bloco. Variáveis que são limites fixos de bloco são as únicas que não são saída de nenhum bloco.

- Todo bloco com limite deverá ter os dois limites definidos.

- As conexões de CDU com os outros modelos é feita através dos blocos tipo IMPORT e EXPORT.

- No modo ANAT (execução de caso de estabilidade) um CDU só é resolvido se estiver associado a um equipamento.

- No modo ANAC (execução de simulação em controles de forma independente) todos os CDUs lidos serão resolvidos.

A solução dos blocos é feita de forma sequencial e a ordenação visa minimizar o número de variáveis a serem extrapoladas.

3.4.4 Exemplo

Para este trabalho será utilizado, em todas as simulações, um sistema de quarenta e cinco barras, mostrado na Figura 3.3.

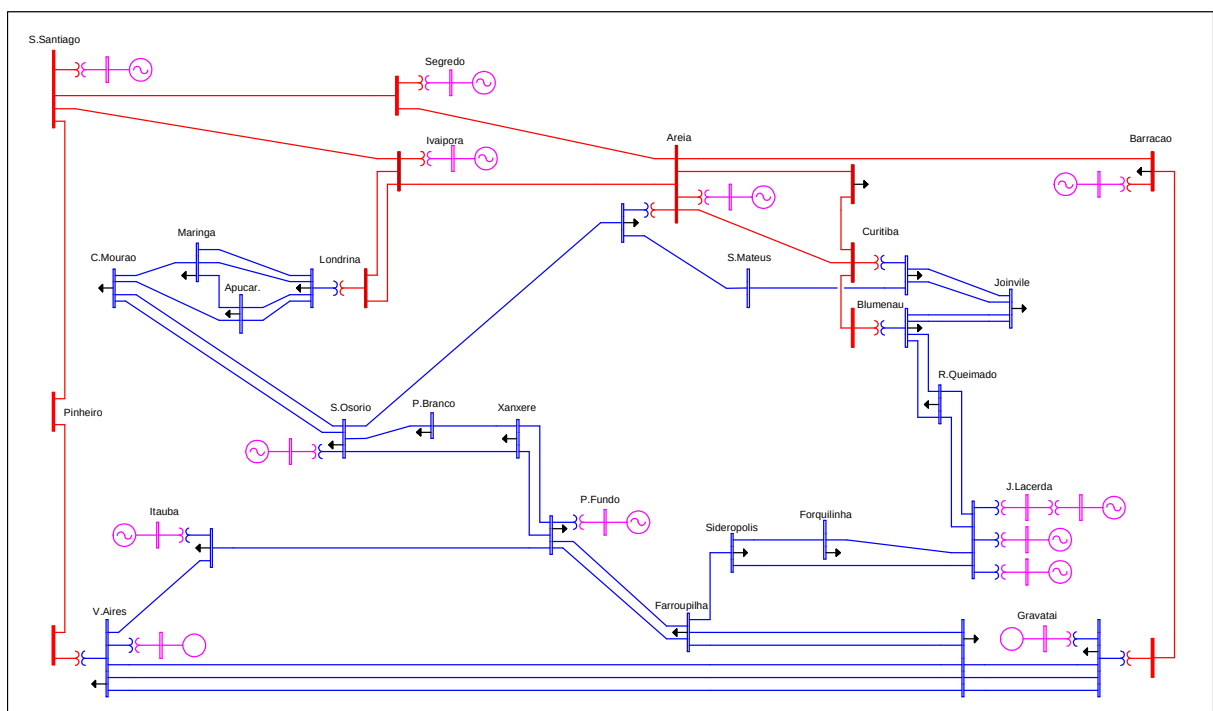


Figura 3.3 – Sistema exemplo de 45 barras

```
ANATEM - [!:\Projeto Final\fmt 5dig certo\regls.cdu]
Arquivo  Editar  Exibir  Simulação  Ferramentas  Janela  Ajuda

regls.cdu

0001 BCDU
0002 (
0003 (ncdu) ( nome cdu )
0004 001 RT_001
0005 (
0006 (EFPAR (npar) ( valpar )
0007 (-----
0008 DEFPAR #Ka 50.0
0009 DEFPAR #Ta 0.05
0010 DEFPAR #Kf 0.30
0011 DEFPAR #Tf 0.90
0012 DEFPAR #Vamax 10.00
0013 DEFPAR #Vamin -1.00
0014 (
0015 (
0016 (nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 ) ( p2 ) ( p3 ) ( p4 ) (vmin) (vmax)
0017 (-----
0018 0001 ENTRAD Vref
0019 0002 IMPORT VTR Vt
0020 0003 SOMA Vref X3
0021 -Vt X3
0022 -X6 X3
0023 0004 LEDLAG X3 Efd #Ka 0.0 1.0#Ta Vamin Vamax
0024 0005 WSHOUT Efd X6 #Kf 1.0#Tf
0025 0006 EXPORT EFD Efd
0026 (
0027 (
0028 (DEFVA (stip) (vdef) ( d1 )
0029 (-----
0030 DEFVAL Vamax #Vamax
0031 DEFVAL Vamin #Vamin
0032 (
0033 FIMCDU
```

Figura 3.4 – Dados de um CDU

Nota-se que este controlador possui seis dados de definição dos parâmetros (cujo código para defini-lo é o DEFPAR), ou seja, para tal CDU tem-se seis constantes (Ka, Ta, Kf, Tf, Vamax e Vamin), que estão entre as linhas 0008 e 0013. Já entre as linhas 0018 e 0025 estão definidos os seis blocos que o controlador possui (ENTRAD, IMPORT, SOMA, LEDLAG, WSHOUT e EXPORT). Cada bloco requer um tipo de dado específico, que precisa ser escrito no programa. Estes dados podem ser um valor de entrada (vent), valor de

saída (vsai), os valores dos parâmetros do bloco (p1, p2, p3 e p4), entre outros. E, por fim, nas linhas 0030 e 0031 estão definidos os valores das variáveis Vamax e Vamin. Os registros de dados de blocos de CDU possuem a forma geral mostrada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Formato dos dados de blocos do CDU [5]

Campo	Colunas	Descrição
Bloco	01 - 04	Número de identificação do bloco
BI	05	Se preenchido com caracter "*" indica que o bloco do CDU é um bloco exclusivamente de inicialização.
Tipo	06 - 11	Tipo do bloco.
Subtipo	13 - 18	Subtipo do bloco.
Sinal	19	Sinal da variável de entrada do bloco. Se for deixado em branco será considerado positivo. Este campo só é utilizado pelos blocos tipo, SOMA, MULTPL e DIVSAO.
Vent	20 - 25	Identificação alfanumérica da variável de entrada do bloco.
Vsai	27 - 32	Identificação alfanumérica da variável de saída do bloco.
P1	34 - 39	Parâmetro P1 do bloco.
P2	40 - 45	Parâmetro P2 do bloco.
P3	46 - 51	Parâmetro P3 do bloco.
P4	52 - 57	Parâmetro P4 do bloco.
Vmin	59 - 64	Identificação alfanumérica da variável associada ao limite inferior.
Vmax	66 - 71	Identificação alfanumérica da variável associada ao limite inferior.

3.5 Módulo base (MS-DOS)

3.5.1 Ambiente

O modelo base do programa é feito no ambiente MS-DOS. A comunicação entre o usuário e o programa é realizada através de comandos que devem ser digitados na tela principal do programa, que está mostrada na Figura 3.5.

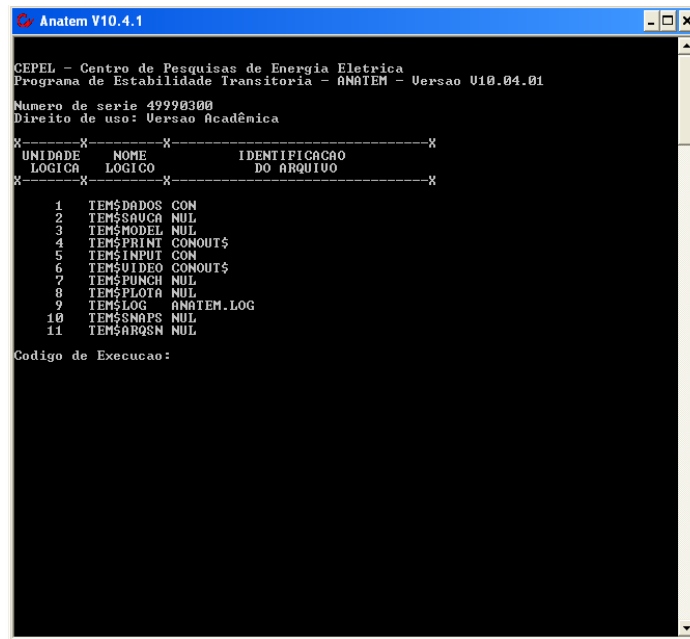


Figura 3.5 – Tela principal do ANATEM

Vale ressaltar que ainda não há nenhuma versão disponível do programa na qual seja possível visualizar como é o sistema elétrico que o usuário está estudando, ou seja, o programa não gera ou abre nenhum arquivo de imagem, exibindo a representação gráfica do sistema, como é possível em outros programas do CEPEL, tais como o ANAREDE e o ANAFAS.

3.5.2 Unidades lógicas

Ao inicializar o ANATEM, abre-se a tela principal, em que é pedido um código de execução. O código a ser digitado, para dar início à simulação, é o ULOG que é um código de associação de arquivos às unidades lógicas. Há quatorze unidades lógicas, cada uma associada a um tipo de arquivo como mostrado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Descrição das Unidades Lógicas [5]

Unidade Lógica	Descrição
# 1	Arquivo de dados de entrada com os Códigos, Opções de Controle de Execução e dados relativos ao sistema elétrico em estudo.
# 2	Arquivo ANAREDE de casos armazenados de fluxo de potência.
# 3	Arquivo de dados de modelos armazenados para estabilidade.
# 4	Arquivo de impressão de relatório se a opção de controle de execução FILE estiver ativada, nos formatos 132 ou 80 colunas.
# 5	Terminal de vídeo. Esta unidade lógica não pode ser redirecionada.
# 6	Arquivo de impressão dos relatórios no terminal de vídeo no formato 80 colunas. Esta unidade lógica não pode ser redirecionada.
# 7	Arquivo de gravação dos Códigos, Opções de Controle de Execução e dados relativos ao sistema elétrico, no formato dos dados de entrada.
# 8	Arquivo de saída de dados para plotagem.
# 9	Arquivo para armazenamento de mensagens de eventos durante a simulação.
# 10	Arquivo para gravação/ leitura de arquivo de “snapshot”.
# 11	Arquivo para importação de sinais externos por controles CDU.
# 20	Arquivo de formatos utilizados pelo programa.
# 21	Arquivo de mensagens utilizadas pelo programa.
# 22	Arquivo temporário.

3.5.3 Arquivos plt

Antes e no decorrer da simulação, estão disponíveis diversos relatórios de saída. Para a análise gráfica dos resultados, tem-se disponível inúmeras grandezas dos elementos das redes elétricas e dos modelos de reguladores pré-definidos. Quando se trata de CDU, ao usuário estão disponíveis todas as variáveis de saída presentes no diagrama de blocos do controlador.

Ao se instalar o ANATEM, dentro do seu pacote de instalação vem o programa Plotgraf, que tem a função de visualização dos gráficos gerados na simulação do arquivo estudado. Para isto o programa converte o arquivo *plt*, que foi gerado no final da simulação pelo ANATEM, em outro na extensão *~pl*, para por fim o usuário poder visualizar o gráfico.

O Plotgraf é uma ferramenta obsoleta, há várias versões o CEPEL recomenda que se utilize uma outra ferramenta, o Plot CEPEL. Esta será tratada com mais detalhes no próximo capítulo. Um dos pontos fracos do Plotgraf é que o programa só permite que o usuário escolha no máximo cinco variáveis, caso for escolhido mais do que esta quantidade o programa dá

uma mensagem de erro dizendo que não é possível. Dentre as principais variáveis de saída têm-se: ângulo do eixo q do gerador em graus, tensão de campo do gerador em pu, potência elétrica ativa interna do gerador em MW, potência mecânica da turbina em MW, potência elétrica reativa terminal do gerador em Mvar, potência elétrica ativa interna consumida pela máquina de indução em MW, potência elétrica reativa terminal consumida pela máquina de indução em Mvar, escorregamento da máquina de indução (em relação à frequência nominal) em pu, torque no eixo da máquina de indução em pu, módulo da tensão da barra em pu, potência ativa da carga total na barra CA em MW, potência reativa da carga total na barra CA em Mvar, etc.

3.5.4 Exemplo

Para se fazer uma análise mais detalhada dos resultados que o programa fornece, foi utilizado como exemplo a simulação do sistema de quarenta e cinco barras, que foi mostrado anteriormente na Figura 3.3. Neste sistema um curto-circuito foi aplicado e em seguida removido da barra de Itauba, respectivamente através dos seguintes códigos de execução: APCB (aplicação de curto-circuito em barra CA) e RMCB (remoção de curto-circuito em barra CA). Estes códigos, assim como todos os dados que compõem o sistema, devem ser escritos por meio de linhas de comandos em um programa de edição de textos, presente em qualquer sistema operacional de um computador, e em seguida deve-se salvá-lo na extensão *stb*. A Figura 3.6 mostra as primeiras linhas de comando deste sistema. Nela podemos ver algumas unidades lógicas associadas aos seus respectivos arquivos, e os dados dos modelos de gerador com pólos salientes que estão presentes no sistema.

```

sis45b - WordPad
Arquivo  Editar  Exibir  Inserir  Formatar  Ajuda

ULOG
2
I:\Projeto Final\fmt 5dig certo\RTESTE2.sav
ARQV REST
01
ULOG
3
I:\Projeto Final\fmt 5dig certo\REGLS.CDU
ARQM
ULOG
4
I:\Projeto Final\fmt 5dig certo\SIS45.OUT
ULOG
08
I:\Projeto Final\fmt 5dig certo\SIS45B.PLT
ULOG
9
I:\Projeto Final\fmt 5dig certo\SIS45B.LOG
DCTE IMPR
(CC) (VVVV)
AMX2 1E100
999999
(=====
( Modelos de gerador com polos salientes
(=====
DMDG MD02
(No) O (CS) (Xd) (Xq) (X'd)      (X''d)      (T'd)      (T''d) (T''q)
(No)  (Ra) (H) (D) (MVA) Fr
(..... Governador Bento Munhoz
0056      102.0 76.2 33.6      26.9      7.92      .060 .090
0056      4.000      465.
(..... Jorge Lacerda A
0058      147.0147.0 15.0      8.99      5.00      .030 .070
0058      3.207      55.5
(..... Jorge Lacerda B
0059      231.9231.9 31.5      24.1      4.89      .030 .056
0059      3.097      156.3
(..... Passo Fundo
0060      88.0 62.2 25.6      19.6      4.91      .030 .040
0060      4.349      130.
(..... Salto Santiago
0063      87.0 59.0 30.0      22.0      10.0      .040 .130
0063      4.086      350.5
(..... Itaubá
0064      117.1 81.0 30.6      24.2      9.55      .095 .125
0064      3.659      139.
(..... Salto Osório 5-6
0062      97.0 63.5 32.0      27.0      8.98      .035 .075
0062      3.848      170.
999999

```

Figura 3.6 – Arquivo em stb do sistema exemplo

Para este caso o tempo máximo de simulação escolhido foi de dez segundos e com passo de integração de um milissegundo. A figura a seguir mostra os dados do distúrbio pelo qual o sistema foi submetido, além dos dados da simulação.

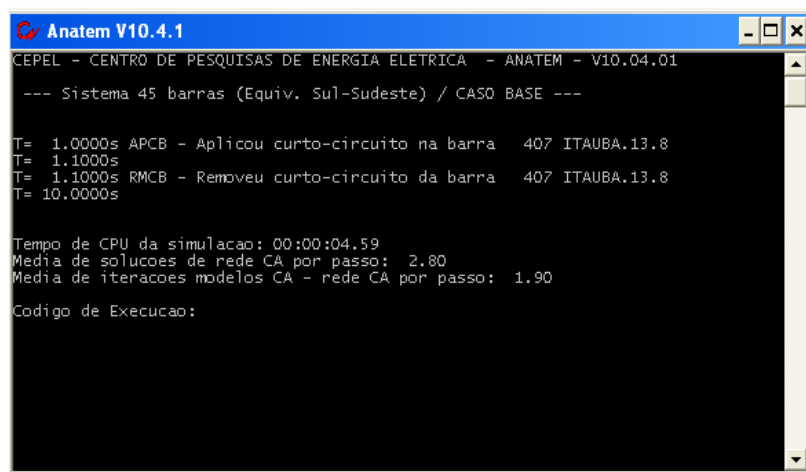


Figura 3.7 – Dados do distúrbio e da simulação

Para validarmos o programa, a Figura 3.8 mostra a tensão na barra na qual foi aplicado o curto. Analisando-se a figura, nota-se que o curto foi aplicado em $t_{\text{aplicação}} = 1,00\text{s}$ e removido em $t_{\text{remoção}} = 1,10\text{s}$, como foi programado, confirmando o resultado desejado.

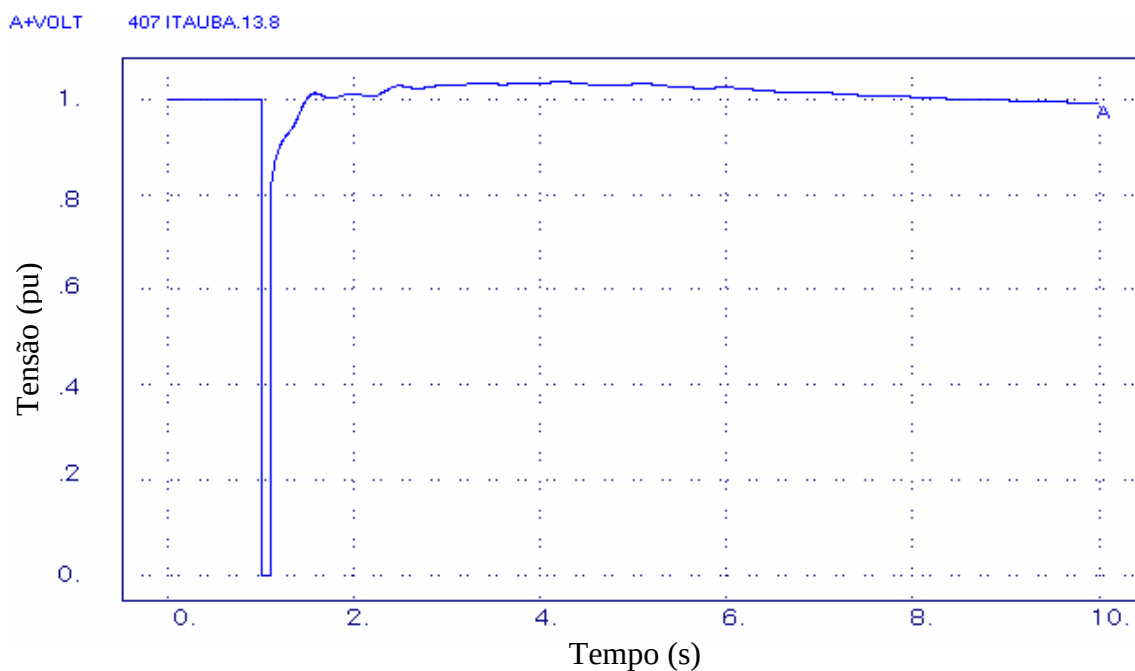


Figura 3.8 – Tensão na barra em que o curto foi aplicado

A seguir são mostrados mais gráficos gerados pela simulação. Todos os gráficos possuem pelo menos quatro variáveis, e em todas as figuras estão presentes os dados referentes à barra na qual foi aplicado o curto. Na Figura 3.9 tem-se cinco variáveis, cada uma com cor diferente. Neste caso as variáveis escolhidas foram a tensão de cinco barras diferentes. Pelo gráfico percebe-se que todas as barras estavam com um valor constante de tensão antes do curto, e após a falta o sistema fica instável. Outro detalhe é que os efeitos são mais severos no local em que o curto foi aplicado.

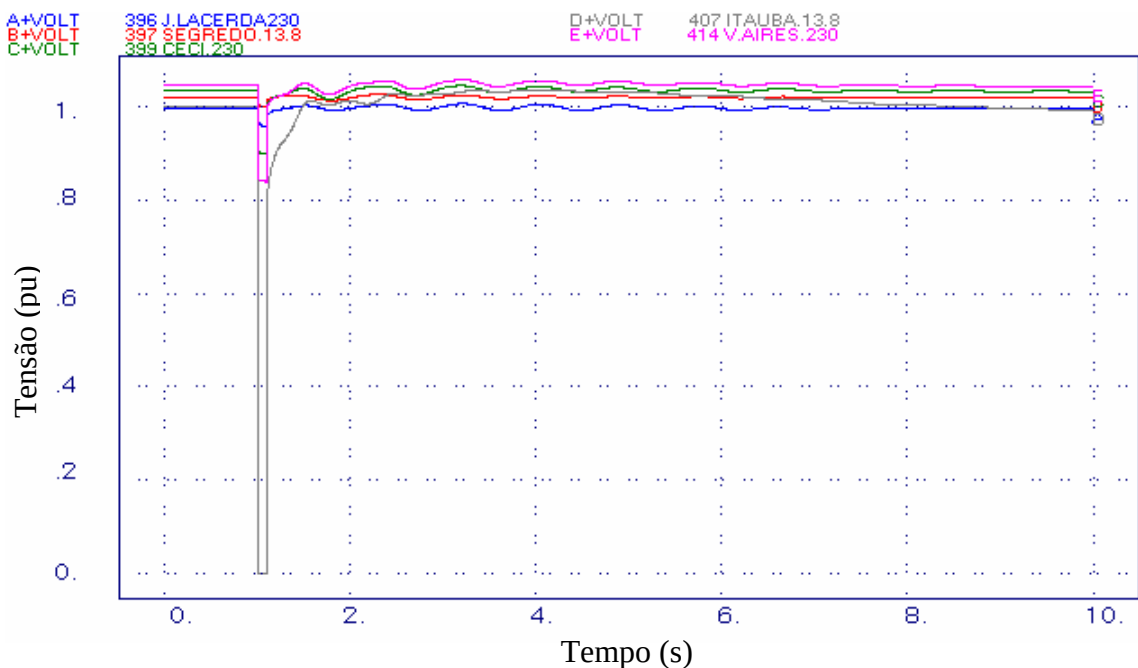


Figura 3.9 – Tensão em cinco barras distintas

Na Figura 3.10 nota-se que a variação do ângulo do eixo q do gerador que estava conectado à barra que sofreu o curto é o mais atingido. Percebe-se que ele teve uma oscilação muito grande comparado com os outros. A Figura 3.11 representa a frequência do gerador. É evidente que o gerador conectado a Itaubá é que sofre mais perturbação na frequência.

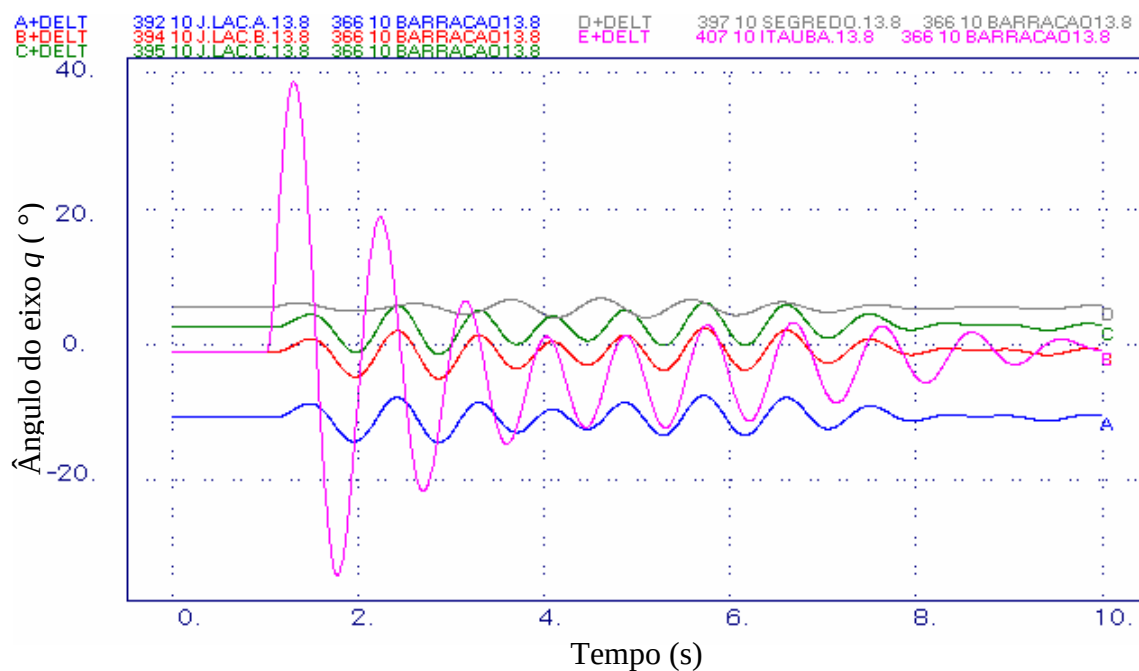


Figura 3.10 – Ângulo do eixo q de cinco barras distintas

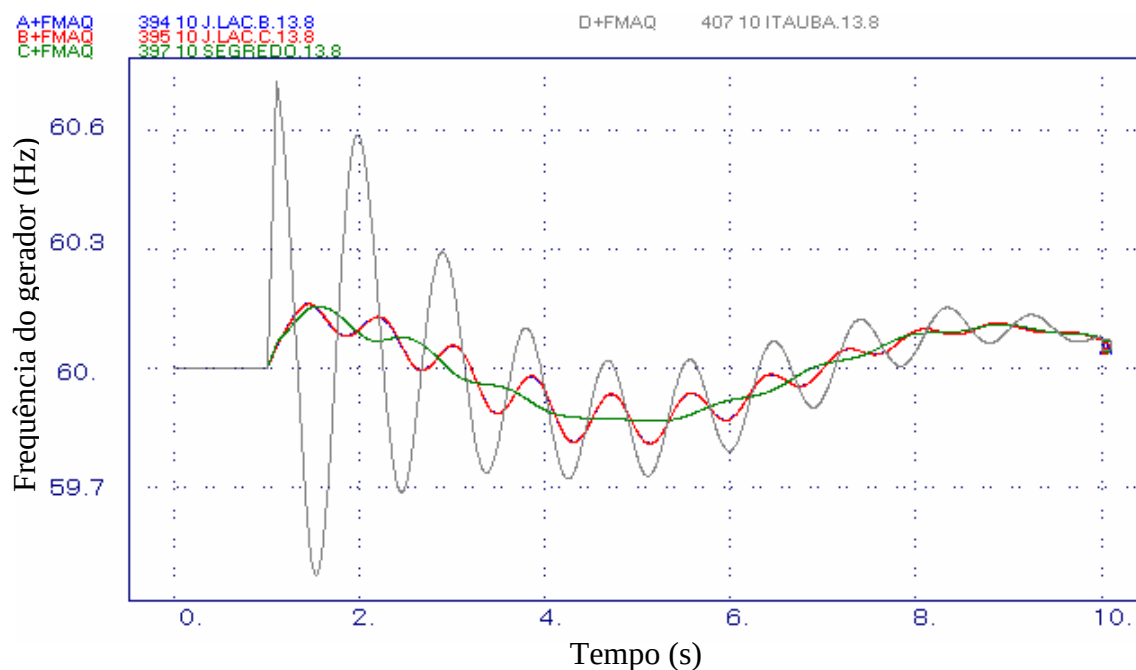


Figura 3.11 – Frequência do gerador

Por fim, as figuras seguintes mostram o comportamento da potência elétrica ativa interna do gerador (Figura 3.12) e da potência mecânica da turbina (Figura 3.13). Observa-se que pelo fato de a potência elétrica estar diretamente relacionada à tensão, no momento em

que foi aplicado o curto, o valor da potência do gerador ligado a barra curto-circuitada cai a zero e oscila bastante, enquanto que a potência das outras barras sofrem pequenas perturbações comparado a ela. Já a potência mecânica não sofre alteração, porque a variação das grandezas mecânicas é mais lenta que a das grandezas elétricas.

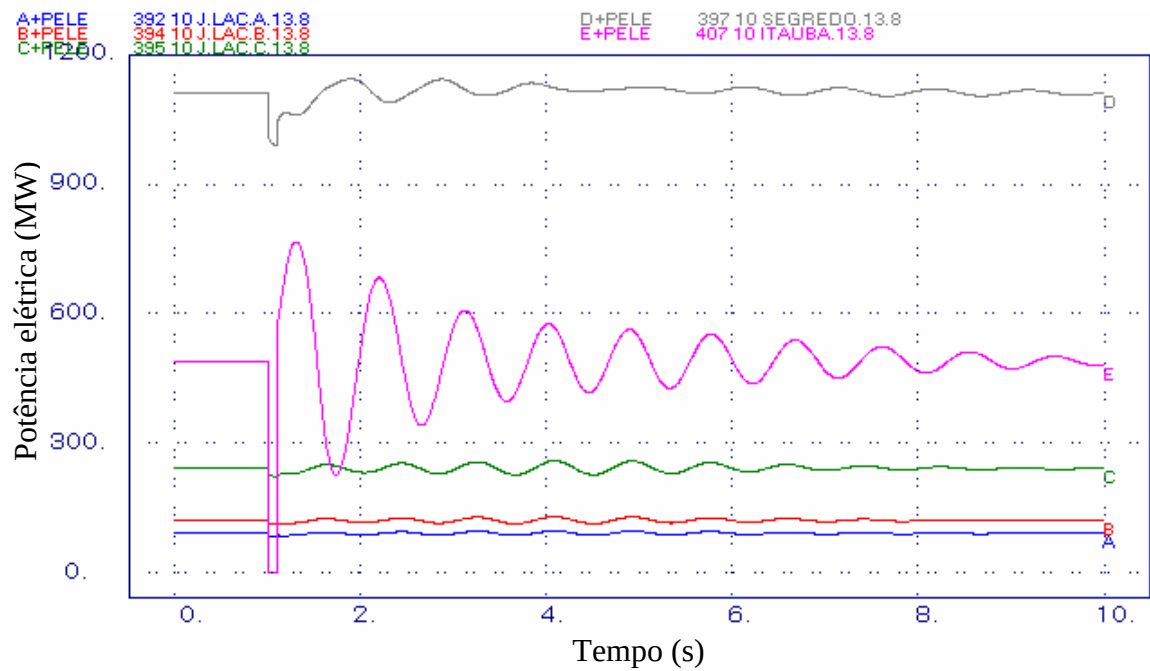


Figura 3.12 – Potência elétrica

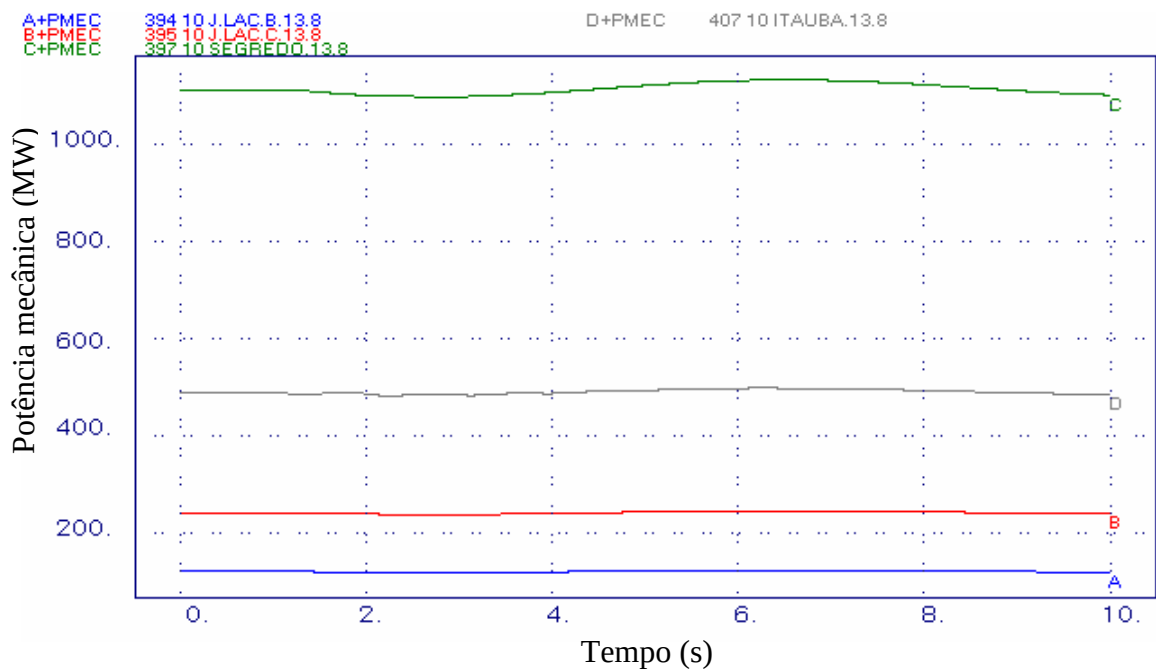


Figura 3.13 –Potência mecânica

Pode-se concluir que os resultados gerados pelos gráficos estão dentro das expectativas, ou seja, estão dentro do esperado para o tipo de perturbação na qual o sistema foi submetido.

Capítulo 4

Novas melhorias no programa ANATEM

4.1 Interface gráfica iANATEM

Como já foi mencionado, a versão 10.04.01 do ANATEM possui um ambiente gráfico de grande funcionalidade. Com esta Interface Gráfica do ANATEM (iANATEM), o usuário consegue editar e criar arquivos de dados, além de simular o caso aberto no editor ou preparar para simular em modo lote diversos casos, recurso que a versão em DOS não possui. A versão antiga não dá disponibilidade de simular dois sistemas ao mesmo tempo, apenas separadamente. Um outro recurso de muita utilidade é a possibilidade de abrir os arquivos associados às unidades lógicas através de comandos de menu.

4.1.1 Ambiente

O novo editor de arquivos de dados incorporado à interface (de extensão *stb*) agora destaca, com o recurso das cores, os códigos de execução, o texto indicativo de fim de código de execução, as colunas das linhas de dados inválidas e os campos de dados adjacentes, além de outras facilidades que serão destacadas mais adiante. Esta nova forma de apresentação facilita, visivelmente, na edição do arquivo.

Nesta nova versão foi desenvolvida uma interface para o programa principal e um editor de diagrama de blocos, o CDUEdit, para o projeto de Controladores Definidos pelo Usuário. Esta versão disponível inclui o programa Plot CEPEL, que também está integrado neste novo ambiente, o que facilitou a visualização dos resultados e o acompanhamento ao longo da simulação. Todas estas novas ferramentas serão tratadas com mais detalhe mais adiante. A comunicação entre todos estes módulos é feita através da escrita e leitura de arquivos, mostrado esquematicamente na Figura 4.1 [1].

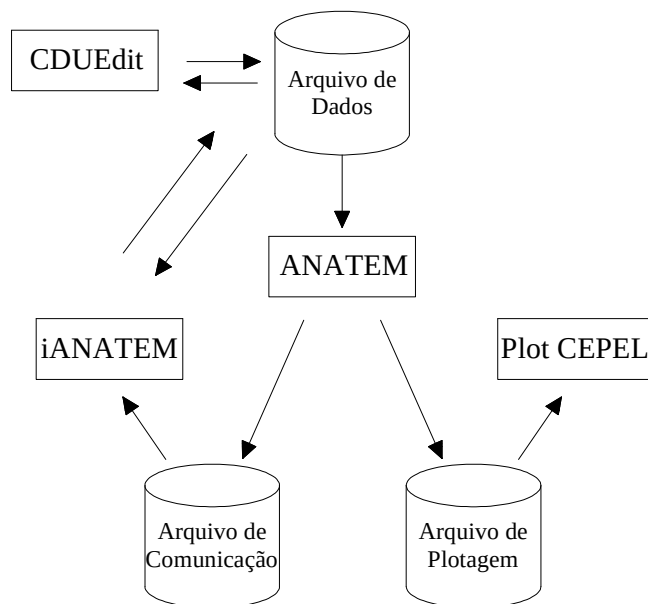


Figura 4.1 – Comunicação entre os processos [1]

Com a interface veio a possibilidade de se editar os dados do sistema, e com o CDUEdit é possível editar os controladores definidos pelo usuário. A interface inicia o núcleo de cálculo e o Plot CEPEL em processos separados e através de amostragem verifica se o núcleo de cálculo está sendo executado. No decorrer da simulação, a interface faz a leitura de dados do arquivo de comunicação e atualiza as informações nas janelas de visualização [1].

No final da simulação a interface mostra automaticamente os arquivos de saída gerados pelo núcleo de cálculo. Outro detalhe diferencial desta nova versão é a possibilidade de poder visualizar os resultados durante a simulação, o que permite a paralisação da simulação, caso o resultado não seja, por exemplo, o esperado. O Plot CEPEL passa a ler o arquivo em intervalos de tempo constantes, de forma a atualizar continuamente o gráfico corrente durante a simulação [1].

4.1.2 Editor de dados

O editor de dados do ANATEM foi desenvolvido com o objetivo de facilitar a criação e alteração dos arquivos de dados que são fornecidos e gerados pelo programa. Antes, para modificar estes arquivos, que possuem extensão *stb*, era necessário abri-lo por um programa de edição de texto, como por exemplo, o *WordPad* da *Microsoft*. Agora, com a nova versão, a

Interface ANATEM abre o próprio arquivo de extensão *stb*. Nos próximos parágrafos serão destacadas ferramentas que diferenciam esta versão gráfica da versão em DOS.

A primeira ferramenta a ser destacada é a possibilidade de abertura de um caso ou de um arquivo. **Caso** é um arquivo de ANATEM para execução, normalmente com extensão *stb*, enquanto que **Arquivo** são todos os demais textos ou banco de dados utilizados pelo ANATEM, com as extensões: *dat*, *cdu*, *blt* e *stb*. Ainda inserido neste assunto, o programa disponibiliza a opção de abrir um caso ou arquivo **Padronizado**, que possui os principais comandos para se fazer a simulação de um sistema.

A Figura 4.2 mostra a tela que abre quando escolhemos a opção de novo caso/arquivo padronizado. Na figura percebemos que alguns dos principais comandos aparecem, tais como: TITU; ULOG 4, 8 e 9; DOPC e DCTE, o que facilita a tarefa do usuário, na hora que ele estiver escrevendo as linhas de comando, faltando preencher os dados específicos do sistema a ser simulado.

```

001 (=====
002 ( TITULO DO CASO
003 (=====
004 TITU
005 | Caso exemplo
006 (
007 (=====
008 ( ASSOCIACAO DE ARQUIVOS
009 (=====
010 ( * Arquivo para saida de relatorios ( opcao FILE )
011 ULOG
012 | 4
013 | anatem.out
014 (
015 ( * Arquivo para saida de plotagem
016 ULOG
017 | 8
018 | anatem.plt
019 (
020 ( * Arquivo para saida de mensagens de eventos da simulacao
021 ULOG
022 | 9
023 | anatem.log
024 (
025 (=====
026 ( DADOS DE OPCOES DEFAULT DE EXECUCAO
027 (=====
028 DOPC IMPR
029 | (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E
030 | IMPR L FILE L CONT L
031 | 999999
032 (
033 (=====
034 ( DADOS DE ALTERACAO DE CONSTANTES DO PROGRAMA
035 (=====
036 DCTE
037 | (Ct) (Val )
038 | TETE 1.e-4 Tolerancia relativa para convergencia de tensoes
039 | TEMD 1.e-4 Tolerancia relativa para convergencia de modelos
040 | TABS 1.e-7 Tolerancia absotura
041 | TEPQ .1 Tolerancia de convergencia desejada para o fluxo de potencia
042 | 999999

```

Figura 4.2 – Arquivo Padronizado

Se clicarmos com o botão direito do mouse sobre uma linha irá aparecer uma janela, como mostra a Figura 4.3(a), e escolhermos a opção **Inserir** e depois clicarmos em **Régua**, o editor identifica a qual código de execução a linha corrente pertence e insere automaticamente na linha imediatamente abaixo a régua dos dados do respectivo código de execução. Como exemplo foi inserida uma linha referente ao código de execução DRGT (modelos predefinidos de regulador de tensão e excitatriz de máquina síncrona). A linha inserida é a dos parâmetros necessários para este código, que são eles: CS, Ka, Ke, Kf, Tm, Ta, Te, Tf, Lmn, Lmx e LS, como mostra a Figura 4.3(b).

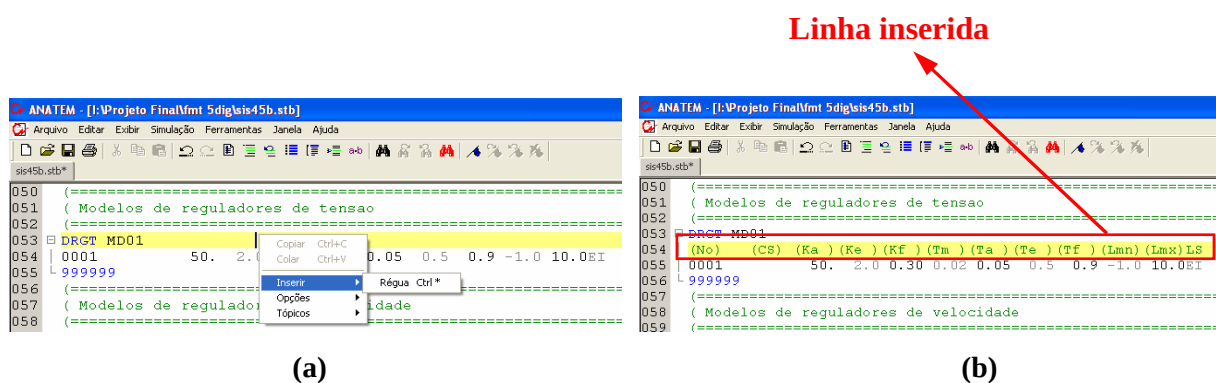


Figura 4.3 – (a) Inserção da régua; (b) Linha correspondente ao código que foi inserida

É possível abrir ou fechar um código de execução, de forma similar a uma estrutura de diretório e subdiretórios. Com esta facilidade se torna possível visualizar as linhas de dados pertencentes a esse código ou então esconder as mesmas, o que facilita a visualização do arquivo como um todo. Isso pode ser feito através da opção **Tópicos** que está no menu **Exibir** ou clicar no ícone + ou – que está ao lado do código de execução.

Uma outra ferramenta que esta interface possui é uma sintaxe colorida. Esta versão modifica as cores dos textos para as linhas comentadas, que ficam com a cor verde, e os textos que identificam os códigos de execução, com a cor azul. A Figura 4.4 mostra a diferença do antigo editor de arquivos de dados para o mais recente.

```

=====
( TITULO DO CASO
=====
TITU
Sistema teste 14 barras - SALVANDO SNAPSHOT EM 15s DE SIMULACAO
(
=====
( ASSOCIACAO DE ARQUIVO PARA SAIDA DE RELATORIOS ( opcao FILE )
=====
ULOG
4
I:\R\sis14b_1.out
(
=====
( ASSOCIACAO DE ARQUIVO COM FLUXO DE POTENCIA ( ANAREDE )
=====
ULOG
2
I:\R\sis14b.his
(
=====
( ASSOCIACAO DE ARQUIVO COM DADOS PARA PLOTAGEM
=====
ULOG
8
I:\R\sis14b_1.plt
(
=====
( ASSOCIACAO DE ARQUIVO DE SAIDA DE MENSAGENS DE EVENTOS
=====
ULOG
9
I:\R\sis14b_1.log
(
=====
( DADOS DE OPCOES DEFAULT DE EXECUCAO
=====
DOPC IMPR CONT
(Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E
IMPR L FILE L CONT L 80CO L
999999
( Obs: Neste codigo esta' se pedindo por "default" a impressao de dados
( em todos os codigos ( opcao IMPR ), que qualquer impressao de
( saida seja enviada para o arquivo associado na unidade logica 4
( ( opcao FILE ), que qualquer relatorio emitido esteja em formato
( de 80 colunas ( opcao 80CO ) e que em caso de impressao no video
( NAO seja interrompida a impressao apos cada tela e NAO seja
( emitido um "prompt" para o usuario liberar a continuacao de
( impressao ( opcao CONT ).
=====

```

(a)

```

=====
( TITULO DO CASO
=====
TITU
Sistema teste 14 barras - SALVANDO SNAPSHOT EM 15s DE SIMULACAO
(
=====
( ASSOCIACAO DE ARQUIVO PARA SAIDA DE RELATORIOS ( opcao FILE )
=====
ULOG
4
I:\R\sis14b_1.out
(
=====
( ASSOCIACAO DE ARQUIVO COM FLUXO DE POTENCIA ( ANAREDE )
=====
ULOG
2
I:\R\sis14b.his
(
=====
( ASSOCIACAO DE ARQUIVO COM DADOS PARA PLOTAGEM
=====
ULOG
8
I:\R\sis14b_1.plt
(
=====
( ASSOCIACAO DE ARQUIVO DE SAIDA DE MENSAGENS DE EVENTOS
=====
ULOG
9
I:\R\sis14b_1.log
(
=====
( DADOS DE OPCOES DEFAULT DE EXECUCAO
=====
DOPC IMPR CONT
(Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E
IMPR L FILE L CONT L 80CO L
999999
( Obs: Neste codigo esta' se pedindo por "default" a impressao de dados
( em todos os codigos ( opcao IMPR ), que qualquer impressao de
( saida seja enviada para o arquivo associado na unidade logica 4
( ( opcao FILE ), que qualquer relatorio emitido esteja em formato
( de 80 colunas ( opcao 80CO ) e que em caso de impressao no video
( NAO seja interrompida a impressao apos cada tela e NAO seja
( emitido um "prompt" para o usuario liberar a continuacao de
( impressao ( opcao CONT ).
=====

```

(b)

Figura 4.4 – (a) Editor de arquivos antigo; (b) Editor de arquivos atual

E por fim a versão possui uma janela de dicas. Se o usuário está querendo saber a que se refere um determinado código de execução do ANATEM, basta parar o cursor do mouse sobre o mesmo, que automaticamente vai aparecer uma janela abaixo dele com um texto explicativo do código em questão. Na Figura 4.5 tem-se um exemplo do código DRGT (modelos predefinidos de regulador de tensão e excitatriz da máquina síncrona).

```

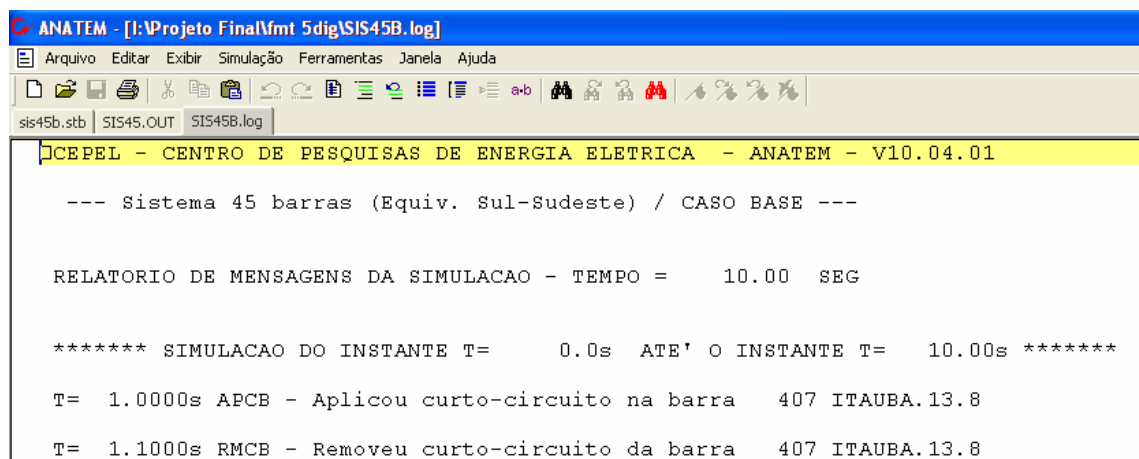
044 | (=====
045 | DRGT MD01
046 | (No) (R) (T) (T1) (T2) (Lmn) (Lmx) (D) T
047 | Dados de modelos predefinidos de reguladores de tensão e excitatrizes
048 | 9999
049 | (=====
050 | ( Modelos de reguladores de velocidade
051 | (=====
052 | DRGV MD02
053 | (No) (R) (T) (T1) (T2) (Lmn) (Lmx) (D) T
054 | 0001 0.05 4.0 0.0 0.01 -999 999 0.0E
055 | 9999

```

Figura 4.5 – Exemplo de janela de dica

4.1.3 Exemplo

Como comparação, para se analisar estas novas facilidades com a interface gráfica, será utilizado o mesmo caso do capítulo anterior (sistema de quarenta e cinco barras). A figura a seguir mostra os dados de evento e da simulação. Na versão em DOS estes mesmos dados foram mostrados pela Figura 3.7, só que agora, com a nova versão, a visualização se torna mais fácil, principalmente devido ao fato de não ser mais uma tela preta e sim uma de fundo branco. E para validar esta analogia, como primeiro exemplo, o sistema será submetido ao mesmo distúrbio: aplicação e remoção de curto-circuito em Itauba, respectivamente em $t = 1,00s$ e $t = 1,10s$. A simulação durou dez segundos, com um intervalo de integração de um milissegundos.

The image shows a screenshot of the ANATEM software interface. The title bar reads "ANATEM - [I:\Projeto Final\mt 5dig\SIS45B.log]". The menu bar includes "Arquivo", "Editar", "Exibir", "Simulação", "Ferramentas", "Janela", and "Ajuda". The toolbar contains various icons for file operations and simulation control. The status bar at the bottom shows "sis45b.stb", "SIS45.OUT", and "SIS45B.log". The main text area displays the following content:

```
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - ANATEM - V10.04.01

--- Sistema 45 barras (Equiv. Sul-Sudeste) / CASO BASE ---

RELATORIO DE MENSAGENS DA SIMULACAO - TEMPO =      10.00  SEG

***** SIMULACAO DO INSTANTE T=      0.0s  ATE' O INSTANTE T=      10.00s *****

T=   1.0000s APCB - Aplicou curto-circuito na barra   407 ITAUBA.13.8

T=   1.1000s RMCB - Removeu curto-circuito da barra   407 ITAUBA.13.8
```

Figura 4.6 – Dados do evento

Como para este exemplo foi aplicado um curto em uma determinada barra, para podermos analisar a resposta do sistema a este evento, foram escolhidos duas variáveis para análise. A primeira é a tensão na barra na qual se aplicou o curto e a segunda a potência elétrica.

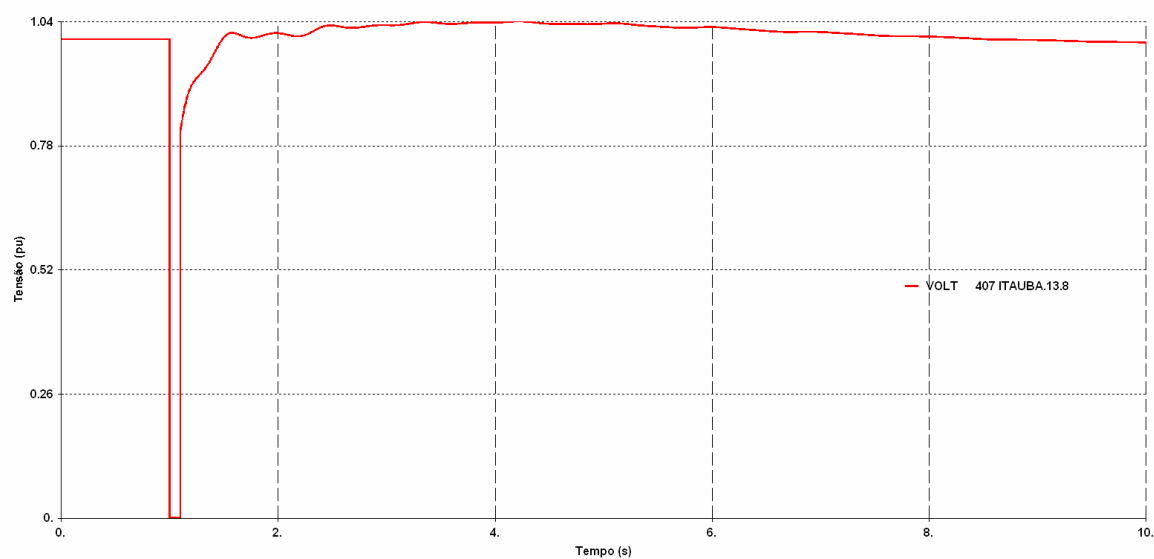


Figura 4.7 – Tensão na barra que foi aplicado o curto

Pelo gráfico acima podemos ter a noção do instante no qual o curto foi aplicado e o intervalo de tempo em que o sistema ficou submetido ao distúrbio. Pela Figura 4.8 podemos comprovar a barra na qual foi aplicado o curto. É possível visualizar que a barra de número 407 é a única em que o valor da tensão foi a zero, confirmando o resultado esperado.

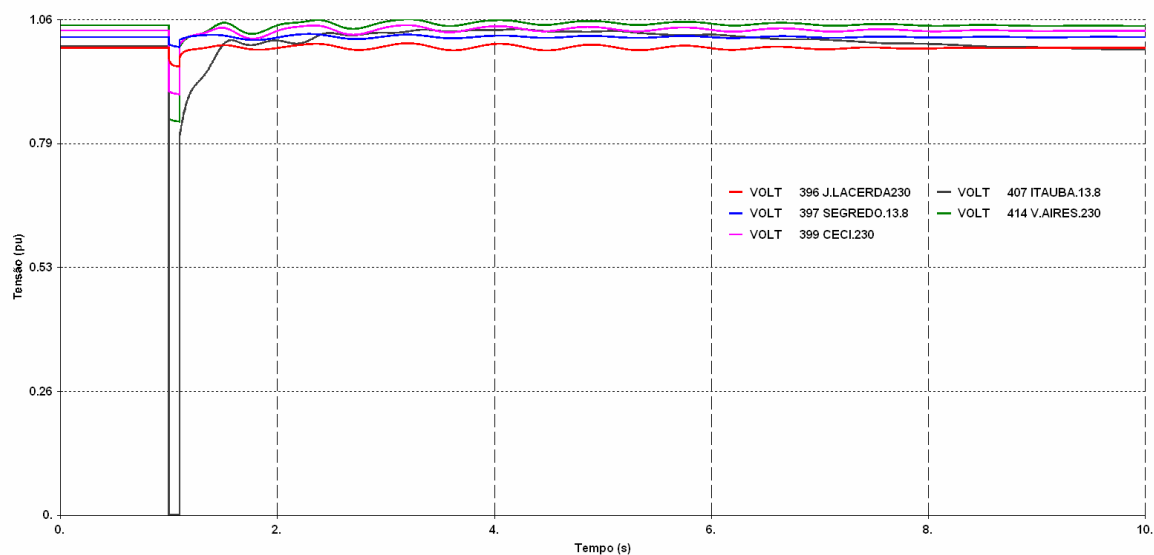


Figura 4.8 – Tensão em cinco barras distintas

Para este exemplo, por fim, temos o gráfico da potência elétrica de cinco barras distintas, pelo fato de esta grandeza estar diretamente relacionada à tensão, no momento em que foi aplicado o curto, o valor da potência do gerador ligado a barra curto-circuitada é a única que o seu valor se reduz a zero, além de ser a que sofre mais oscilação, comparada às outras.

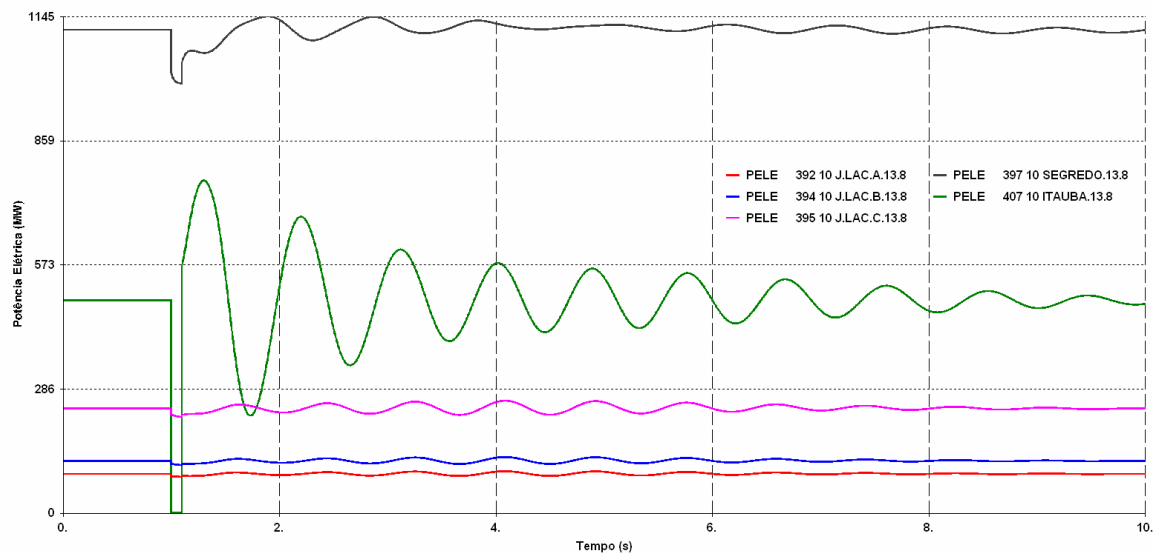


Figura 4.9 – Potência Elétrica

No segundo exemplo será realizada a simulação de um sistema quando se remove alguma unidade geradora ou usina do mesmo. E, para tanto, foi utilizada a mesma barra do exemplo anterior, a de número 407 (Itauba). Para uma boa análise dos efeitos da perturbação, os gráficos escolhidos foram os da tensão de campo da máquina e a tensão na barra. A Figura 4.10 traz os dados do evento, tais como o tempo de simulação e quando o mesmo ocorreu.

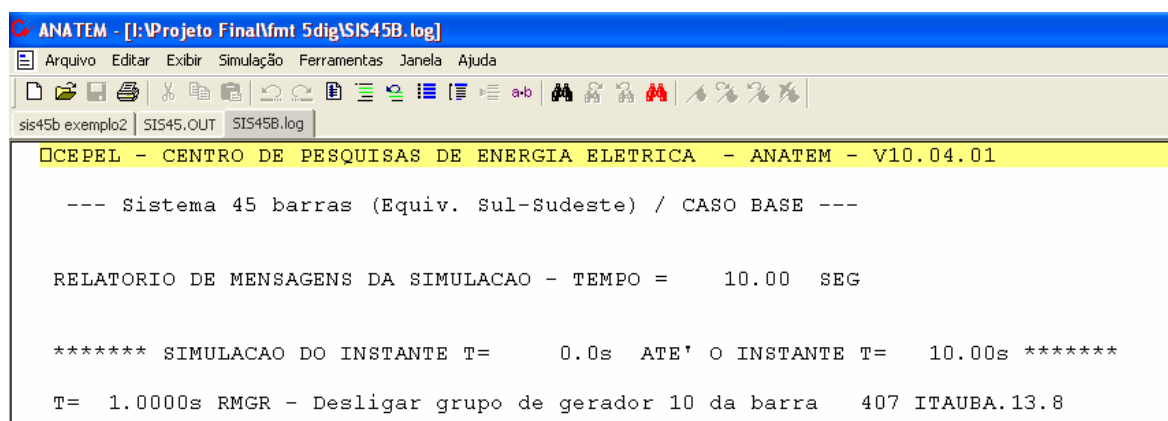


Figura 4.10 – Dados do evento

Os gráficos a seguir (Figuras 4.11 e 4.12) mostram o comportamento da tensão de campo da máquina e da tensão da barra.

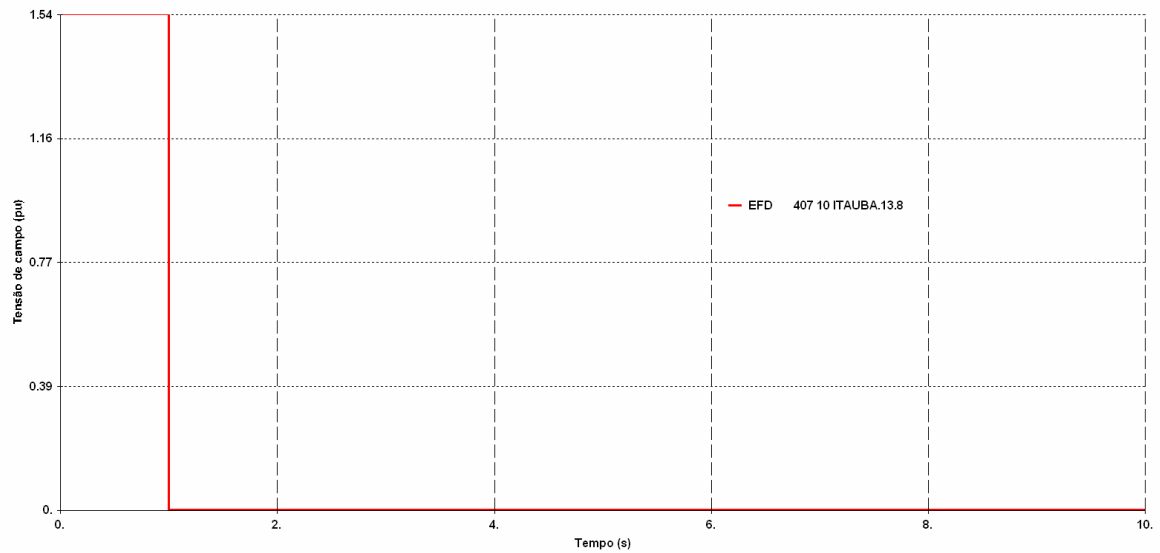


Figura 4.11 – Tensão de campo da máquina (Efd) na barra Itauba

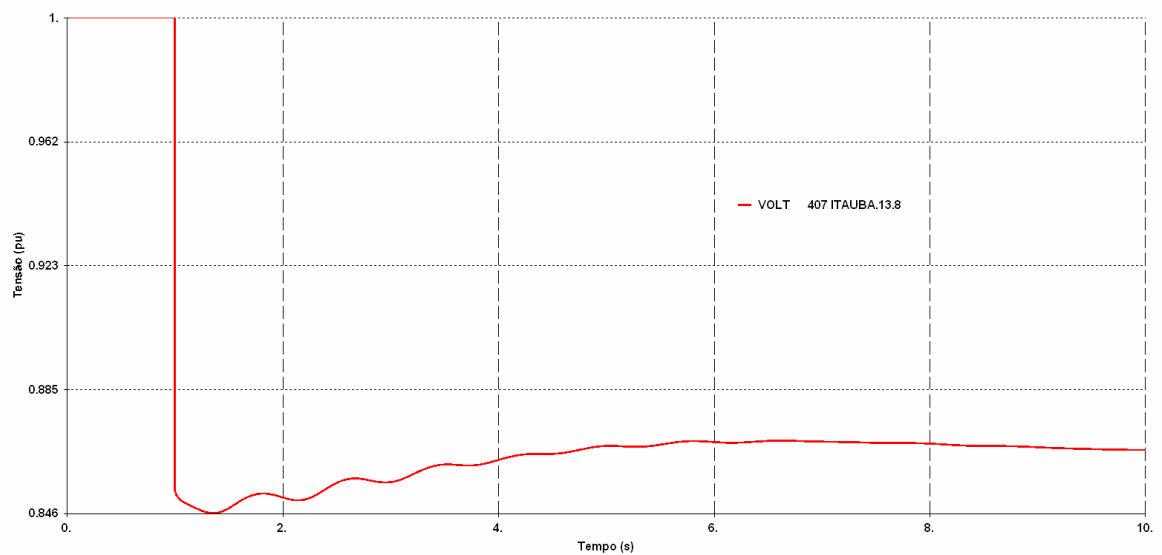


Figura 4.12 – Tensão na barra Itauba

Para finalizar, a Figura 4.13 mostra como é simples a escolha de quais gráficos se deseja visualizar. O menu principal do programa Plot CEPEL possui o ícone “**Graph**”, que quando clicado uma janela se abre com todas as opções de escolha de variáveis de saída. Basta o usuário listar quais deseja. Como dito anteriormente, esta nova versão não possui número máximo de variáveis a ser visualizada. Podemos confirmar isso pela opção “**Check All**” que está nesta janela.

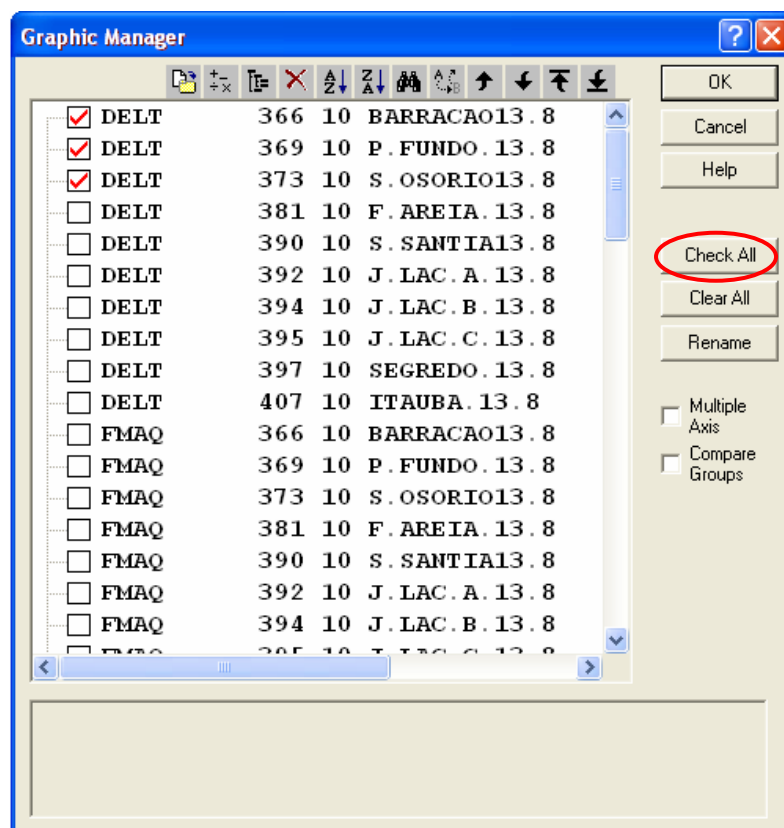


Figura 4.13 – Janela de escolha dos gráficos

Na Figura 4.13 estão selecionadas apenas três variáveis. Para este caso se teria a opção de escolher setenta e cinco variáveis, que é o número máximo. Outro detalhe é que quem escolhe quais são as opções de variáveis de saída é o próprio usuário. Isto é feito no arquivo de extensão *stb*. O código de execução de opção de variáveis é o DPLT (dados de variáveis para plotagem). A Figura 4.14 mostra a parte do arquivo *stb* com os setenta e cinco dados das variáveis de plotagem.

possível escolher se deseja ou não a plotagem automática durante a simulação. Esta escolha só é possível para o caso de um sistema de grande porte, com muitas barras (por exemplo, o Sistema Elétrico Brasileiro) na qual a sua simulação leva horas. Para este caso tem-se a escolha do intervalo de atualização, que é dado em minutos, e o intervalo mínimo é de um minuto. Então se, por exemplo, for feita uma escolha de um intervalo de dois minutos, a cada dois minutos o programa mostra um resultado. Isto é uma ferramenta muito válida, principalmente se o usuário perceber algo errado no decorrer da simulação. Caso isto ocorra basta o usuário cancelá-la, não necessitando esperar durante horas a simulação terminar.

Outra escolha que pode ser feita é com relação a quais arquivos deseja visualizar automaticamente após o término da simulação. São três as opções, duas são arquivos de texto e uma de gráfico.

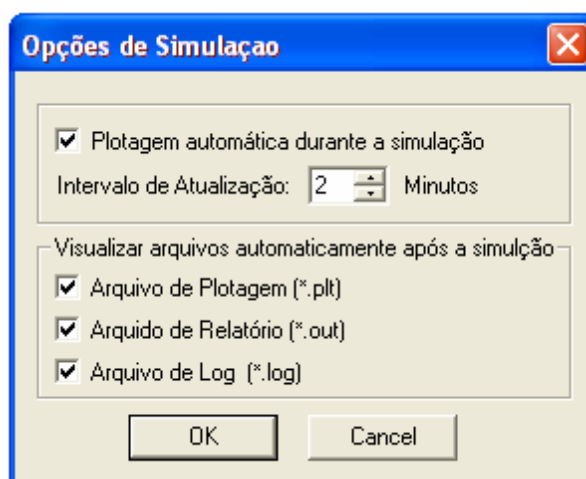


Figura 4.15 – Janela de opções de simulação

Para se realizar a simulação de um caso, basta o usuário selecionar o menu **Simulação** e a opção **Executar**, como mostra a Figura 4.16.

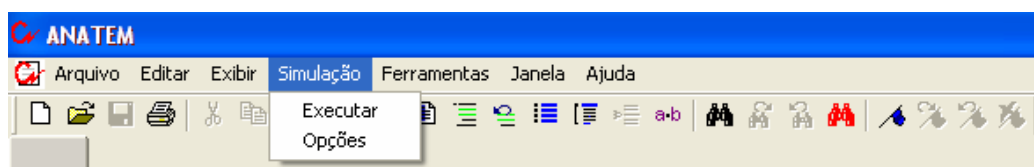


Figura 4.16 – Menu Simulação com a opção Executar

O núcleo de cálculo será então acionado para a análise do arquivo de entrada de dados que estiver aberto, ou seja, para o arquivo *stb*. Durante o processo de simulação a interface apresenta uma janela de diálogo com o tempo da simulação (Figura 4.17).

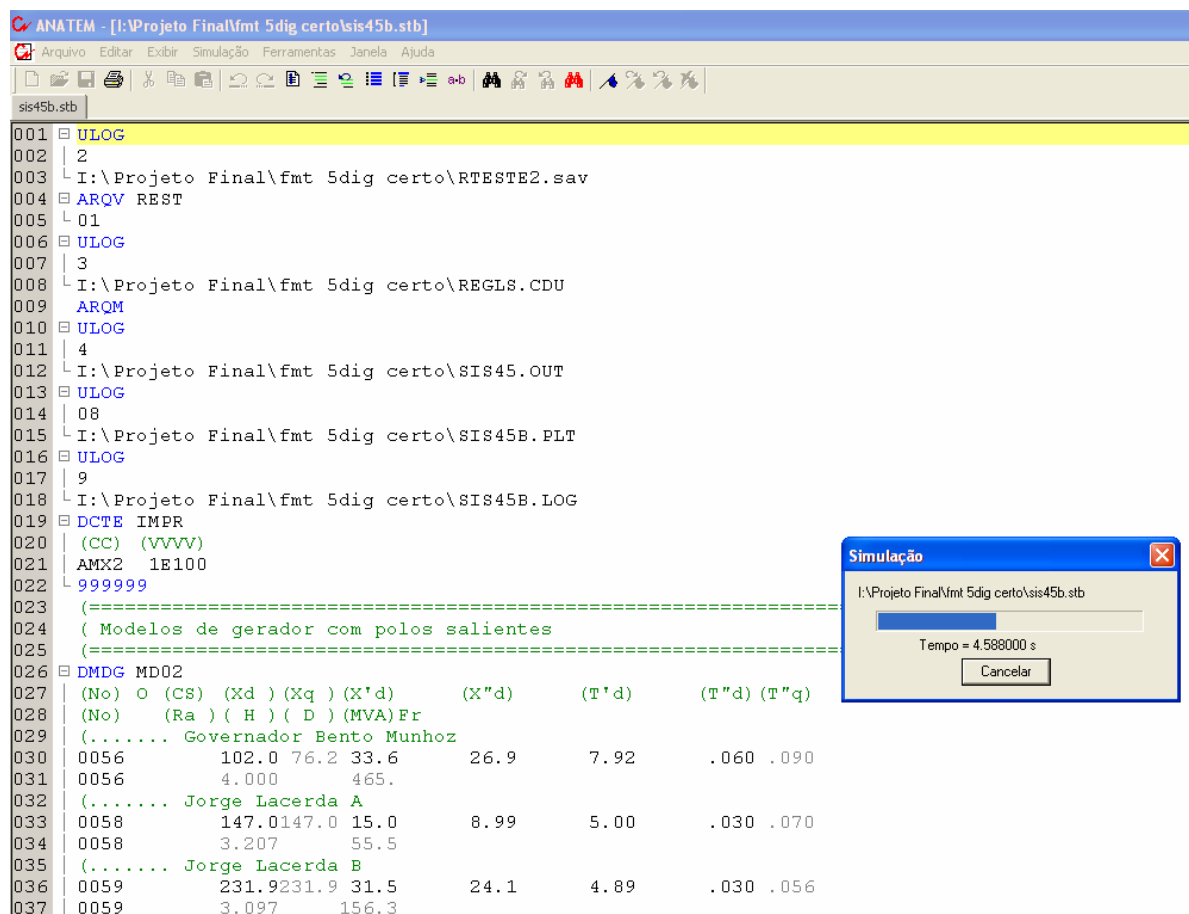


Figura 4.17 – Janela de diálogo com o tempo de simulação

Ao final da simulação, os arquivos de saída serão gerados automaticamente. Para os arquivos de texto (de extensão *log* e *out*) serão criados abas na interface principal do programa, como mostra o detalhe da Figura 4.18. Enquanto que o arquivo gráfico é apresentado no Plot CEPTEL, que é automaticamente acionado ao fim da simulação.

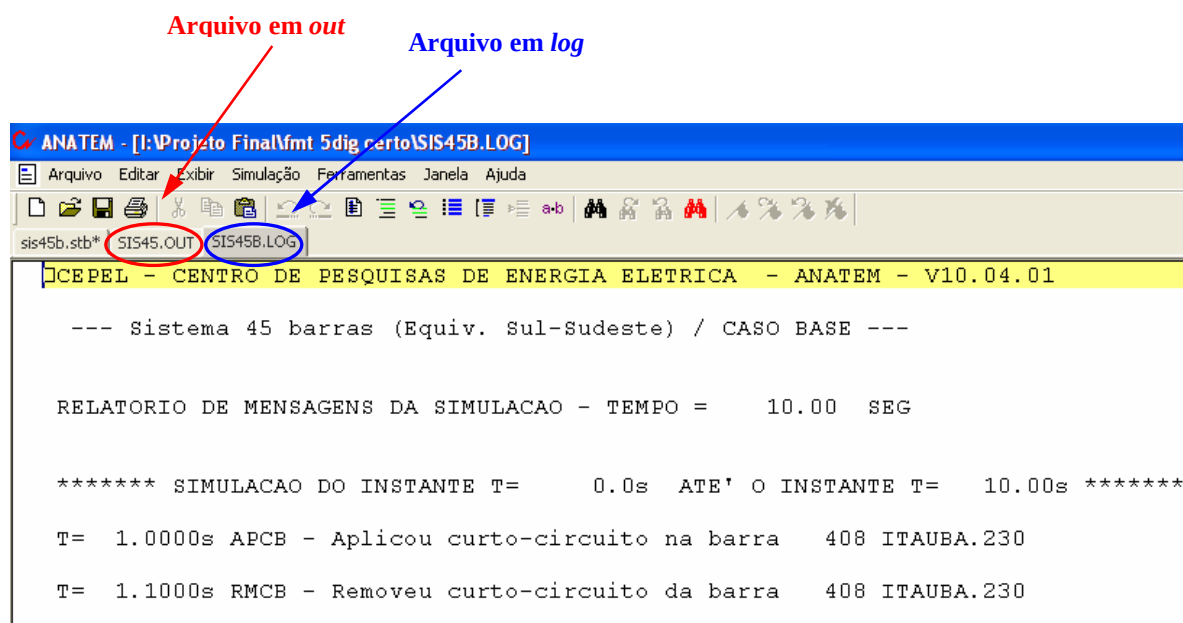


Figura 4.18 – Arquivos texto de saída

O programa Plot CEPEL possui algumas funcionalidades que o Plotgraf não possui. Uma das principais é o fato de se poder visualizar vários arquivos, não tendo restrição quanto ao número que se deseja, já que o Plotgraf só dava opção de no máximo cinco. A Figura 4.19 mostra um exemplo de comparação entre dez gráficos.

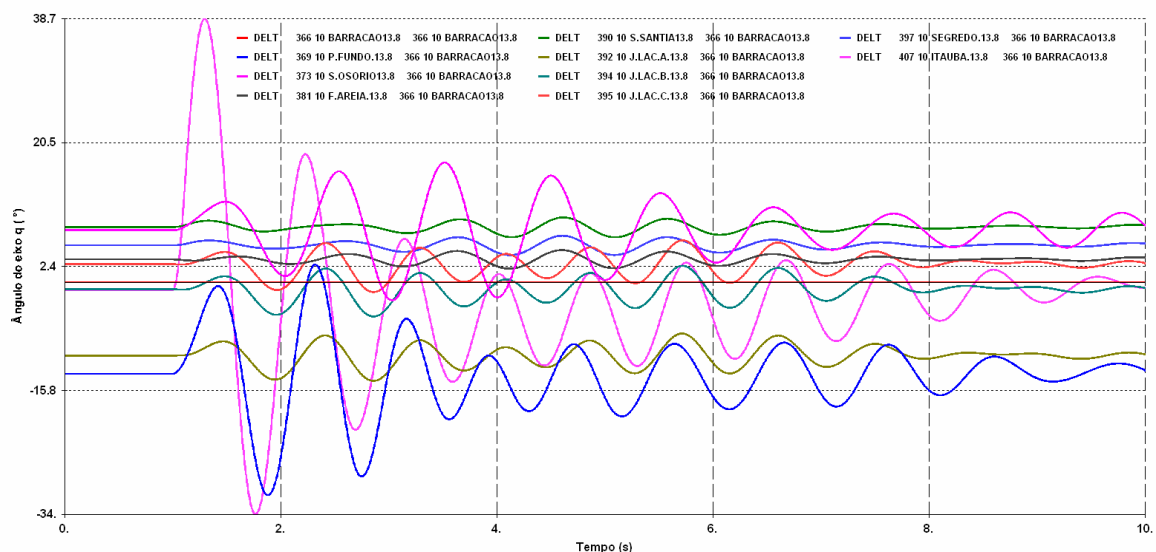


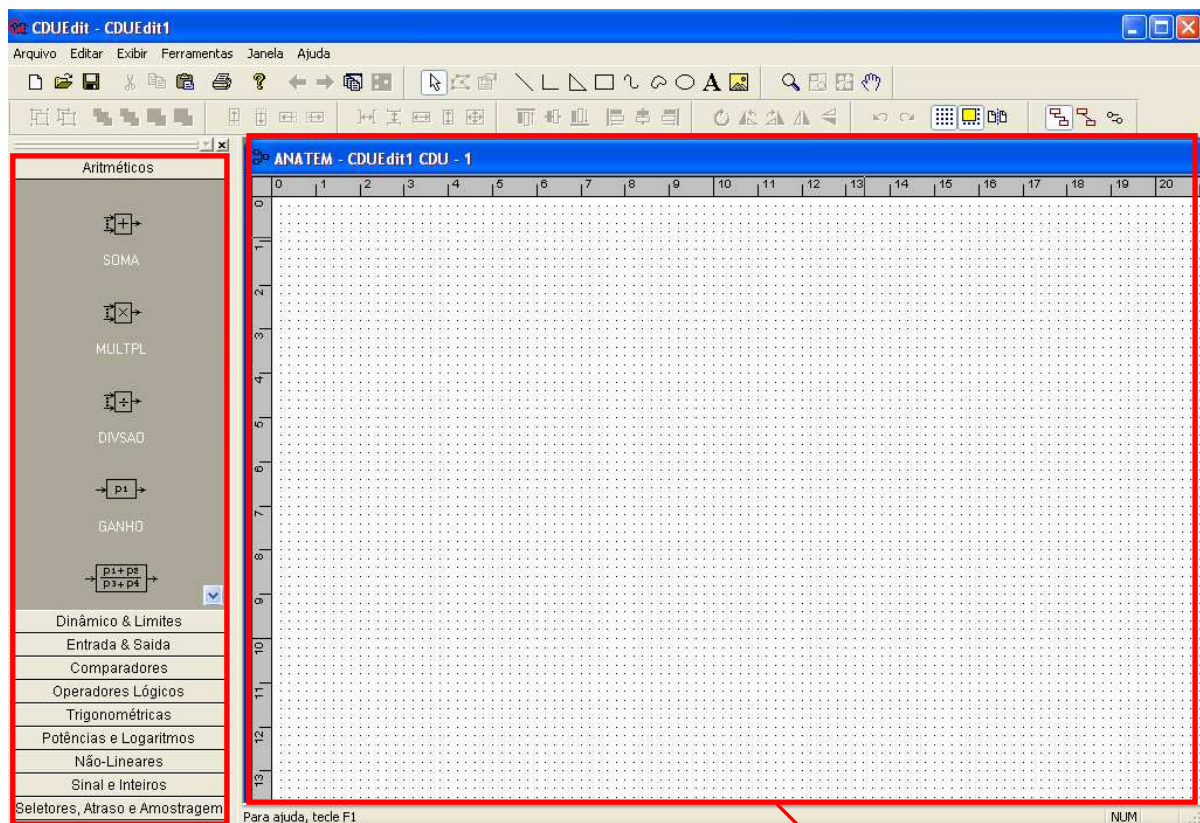
Figura 4.19 – Comparação com alguns gráficos

4.3 CDU Edit

4.3.1 Ambiente

Nas versões anteriores do ANATEM, para o usuário definir um CDU era necessário ele primeiro pensar no diagrama de blocos do controlador que ele desejava. Em seguida, tinha que transformar estes blocos do diagrama em linhas de comandos no programa de editor de dados e salvá-lo em extensão *cdu*. Para este CDU ser incorporado ao sistema, o usuário tinha que inseri-lo no arquivo de extensão *stb* e associá-lo à unidade lógica 3, que é a unidade que faz associação de arquivos com modelos de reguladores.

Agora, com a versão mais atual, a do CDU Edit, pelo fato de ela ser gráfica, ficou mais fácil a criação, compreensão e edição dos controladores definidos pelo usuário. A extensão dos arquivos criados por esse programa é o *cde*. Todos os blocos que estão presentes no ANATEM estão disponíveis neste programa de edição e visualização de diagrama de blocos. Eles foram agrupados na Barra de Seleção de Blocos seguindo a seguinte classificação: Aritméticos, Dinâmicos & Limites, Entrada & Saída, Comparadores, Operadores Lógicos, Trigonométricas, Potências e Logaritmos, Não-Lineares, Sinal e Inteiros e Seletores, Atraso e Amostragem. A Figura 4.20 mostra a barra de seleção de blocos do programa, além da área de trabalho.



Barra de seleção com os blocos do programa

Área de trabalho

Figura 4.20 – Barra de seleção e área de trabalho do CDUEdit

4.3.2 Forma de operação

No programa, os usuários têm acesso a diversas funções elementares para simulação dos controladores representados na forma de diagrama de blocos. A implementação imediata de controladores pode ser feita pelo usuário em qualquer ordem e estrutura. A inicialização destes blocos elementares é feita automaticamente pelo programa, considerando a estrutura de interligação entre os blocos.

Um controlador definido pelo usuário pode utilizar qualquer sinal de outro controlador também definido pelo usuário e as principais grandezas dos componentes do sistema elétrico como sinal de entrada. Desta forma, as principais grandezas dos geradores síncronos (potências elétrica e mecânica, componentes de eixos d e q , velocidade de rotor e ângulo de carga), dos reguladores de tensão (tensão de excitação), sinais de saída dos estabilizadores e compensadores estáticos estão disponíveis aos usuários do programa [4].

Os blocos são criados com uma numeração automática, mas que pode ser alterada pelo usuário. A variável de saída de cada bloco também é criada com um nome automático constituído pela letra X seguido de um número, que corresponde ao número do bloco. Cada um dos blocos é incluído no diagrama arrastando-o para a área de trabalho na posição desejada. A Figura 4.21 mostra o diagrama de blocos do controlador de número 1 do sistema de quarenta e cinco barras, ela mostra a numeração de cada bloco e as variáveis de entrada e saída de cada bloco.

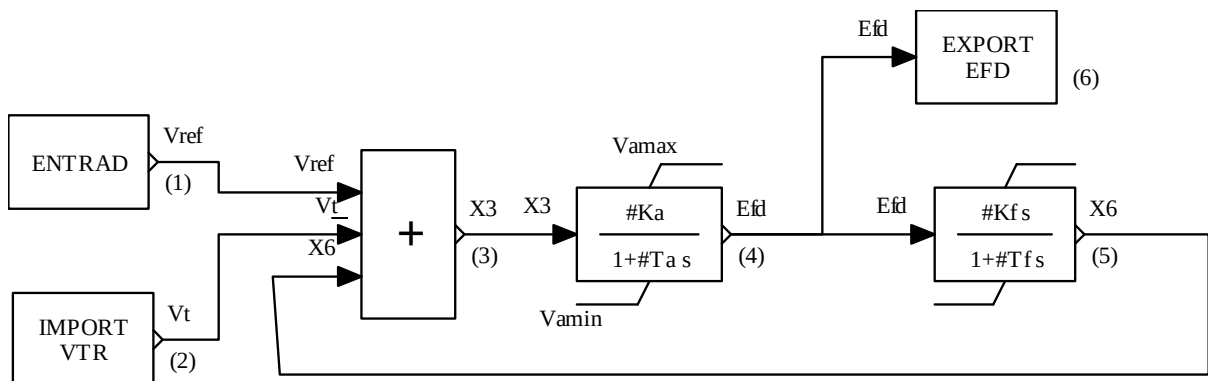


Figura 4.21 – Diagrama de blocos do controlador 1 do exemplo

4.3.3 Exemplo de construção de um CDU

As propriedades de cada bloco são acessadas por um duplo clique no bloco correspondente. Na figura a seguir é apresentada a janela dos parâmetros de um bloco LEDLAG do exemplo da Figura 4.21.



Figura 4.22 – Barra de seleção e área de trabalho do CDUEdit

Comparando-se com a versão antiga (Figura 3.4), nota-se a facilidade da inserção dos parâmetros P1, P2, P3 e P4 e das variáveis Vmin, Vmax e Vsaí. Os campos Vmin e Vmax devem ser sempre preenchidos com o nome de uma variável e não com um valor numérico ou nome de parâmetro. Para o exemplo acima Vmin foi fixado como Vamin e Vmax como Vamax, e a definição dos valores destas variáveis é feita através da opção **DEFVAL** do menu **Editar**. Ao escolher esta opção será aberta uma janela (Figura 4.23) na qual se pode editar, remover ou criar um valor de uma variável.

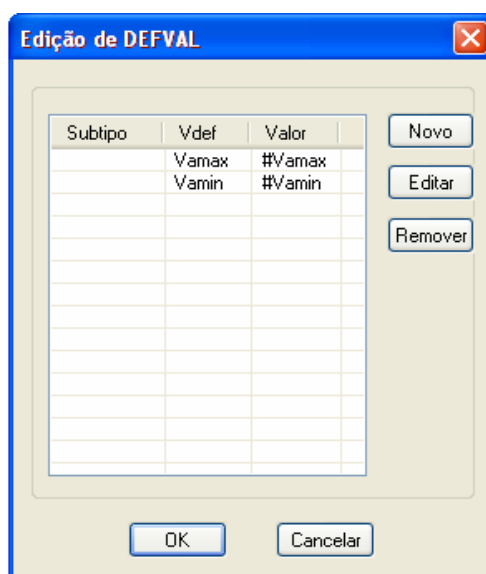


Figura 4.23 – Edição de DEFVAL

Os valores dos parâmetros do bloco (por exemplo #Ka) podem ser definidos na janela mostrada na Figura 4.24 clicando-se nos botões "P1...:", "P2...:", "P3...:" e "P4...:" da janela da Figura 4.22. Podemos comprovar que todos os dados definidos na Figura 3.4 constam nesta janela, inclusive os valores das variáveis Vamin e Vamax.

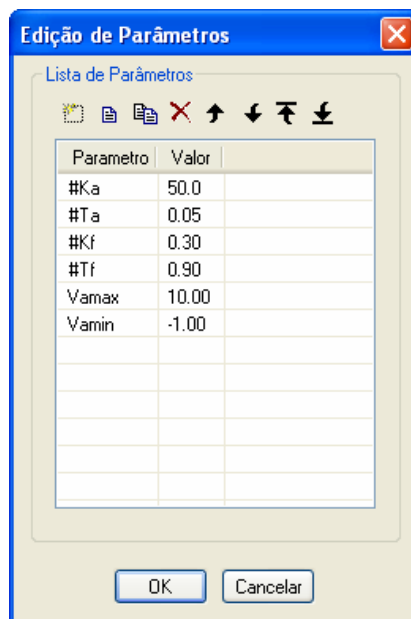


Figura 4.24 – Edição e inclusão de parâmetros

No menu **Editar** com a opção **Variáveis** é possível criar uma variável. Esta opção abre a tela mostrada a seguir, de **Edição de Variáveis** de CDU. Nesta janela o usuário pode criar, renomear, apagar ou apagar todas as variáveis. No caso de apagar ou apagar todas, somente é possível apagar as variáveis sem uso. Caso o usuário tente apagar uma variável em uso, uma mensagem de advertência será mostrada impedindo a ação. As variáveis mostradas na Figura 4.25 são as que foram criadas no exemplo anterior.

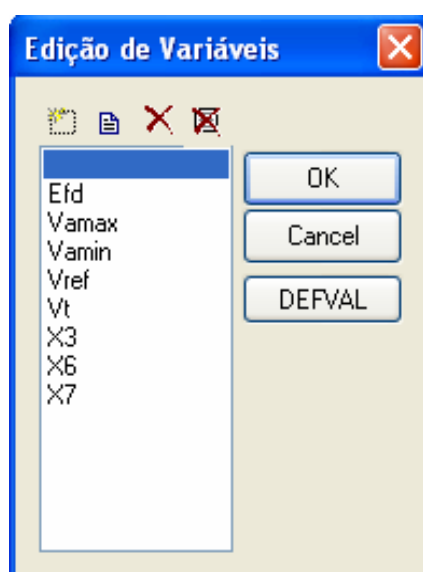


Figura 4.25 – Edição de variáveis

4.3.4 Exportar/Importar para o arquivo de CDUs

Após o término da criação ou edição do diagrama de blocos, a opção **Exportar ANATEM** do menu **Arquivo** pode ser utilizada para a criação de um arquivo de dados no formato do programa ANATEM correspondente aos CDUs que foram criados ou editados. Através desta opção pode-se criar um arquivo de extensão *cdu* que é o do tipo utilizado pela versão antiga, ou seja, um arquivo que é aberto pelo editor de dados. Na Figura 4.26(a) tem-se o arquivo criado ao se escolher esta opção. Observe que o arquivo gerado é bem parecido com o da versão antiga (Figura 4.26(b)) comparando-se estas duas figuras, pode-se constatar que o diagrama de blocos criado pelo CDUEdit corresponde ao do controlador 1 do exemplo em questão.

```
ANATEM - [t:\Projeto Final\CDU numero1.cdu]
Arquivo  Editor  Exibir  Simulação  Ferramentas  Janela  Ajuda
CDU numero1.cdu

01 (=====)
02 ( DADOS DE CDU
03 (=====)
04 @ DCDU
05 (
06 ( nc ) ( nome cdu )
07 @ 1 CDU numero 1
08 (-----)
09 ( (nome) ( valor )
10 (-----)
11 DEFPAR #Ka 50.0
12 DEFPAR #Ta 0.05
13 DEFPAR #Kf 0.30
14 DEFPAR #Tf 0.90
15 DEFPAR Vamax 10.00
16 DEFPAR Vamin -1.00
17 (
18 (nb)(tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 ) ( p2 ) ( p3 ) ( p4 ) (vmin) (vmax)
19 1 ENTRAD Vref Vt
20 2 IMPORT VTR Vt
21 3 SOMA Vref X3
22 -Vt X3
23 X6 X3
24 4 LEDLAG X3 Efd #Ka 0 1.0 #Ta Vamin Vamax
25 5 WSHOUT Efd X6 #Kf 1.0 #Tf
26 6 EXPORT EFD Efd
27 (-----)
28 ( (stip) (vdef) ( d1 )
29 (-----)
30 DEFVAL Vamax #Vamax
31 DEFVAL Vamin #Vamin
32 -FINCDU
33 (
34 -999999
```

(a)

```
regis - WordPad
Arquivo  Editor  Exibir  Inserir  Formatar  Ajuda

DCDU
(
(ncdu) ( nome cdu )
001 RT_001
(-----)
(EFPAR (npar) ( valpar )
(-----)
DEFPAR #Ka 50.0
DEFPAR #Ta 0.05
DEFPAR #Kf 0.30
DEFPAR #Tf 0.90
DEFPAR #Vamax 10.00
DEFPAR #Vamin -1.00
(
(-----)
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 ) ( p2 ) ( p3 ) ( p4 ) (vmin) (vmax)
(-----)
0001 ENTRAD Vref Vt
0002 IMPORT VTR Vt
0003 SOMA Vref X3
-Vt X3
-X6 X3
0004 LEDLAG X3 Efd #Ka 0.0 1.0#Ta Vamin Vamax
0005 WSHOUT Efd X6 #Kf 1.0#Tf
0006 EXPORT EFD Efd
(
(-----)
(DEFVA (stip) (vdef) ( d1 )
(-----)
DEFVAL Vamax #Vamax
DEFVAL Vamin #Vamin
(
FINCDU
```

(b)

Figura 4.26 – (a) Arquivo de extensão cdu gerado pela opção Exportar ANATEM; (b) Arquivo de extensão cdu criado pela versão antiga

A opção **Importar ANATEM** do menu **Arquivo**, por outro lado, lê um arquivo no formato ANATEM que possui o código de execução DCDU e gera um desenho automático com o diagrama de blocos de cada controlador lido. Durante o processo de importação os CDUs são validados e caso exista algum erro o arquivo não será importado. As linhas do arquivo de dados onde ocorreram erros são informadas numa janela de mensagens. Atualmente esta validação somente verifica a duplicidade de números de blocos e nomes de variáveis de saída.

O exemplo utilizado anteriormente é um sistema com duzentos CDUs. Para confirmar isso foi selecionado a opção de importar, e nota-se pela próxima figura que o sistema realmente possui esta quantidade de CDUs e que para este caso nenhum erro foi encontrado.

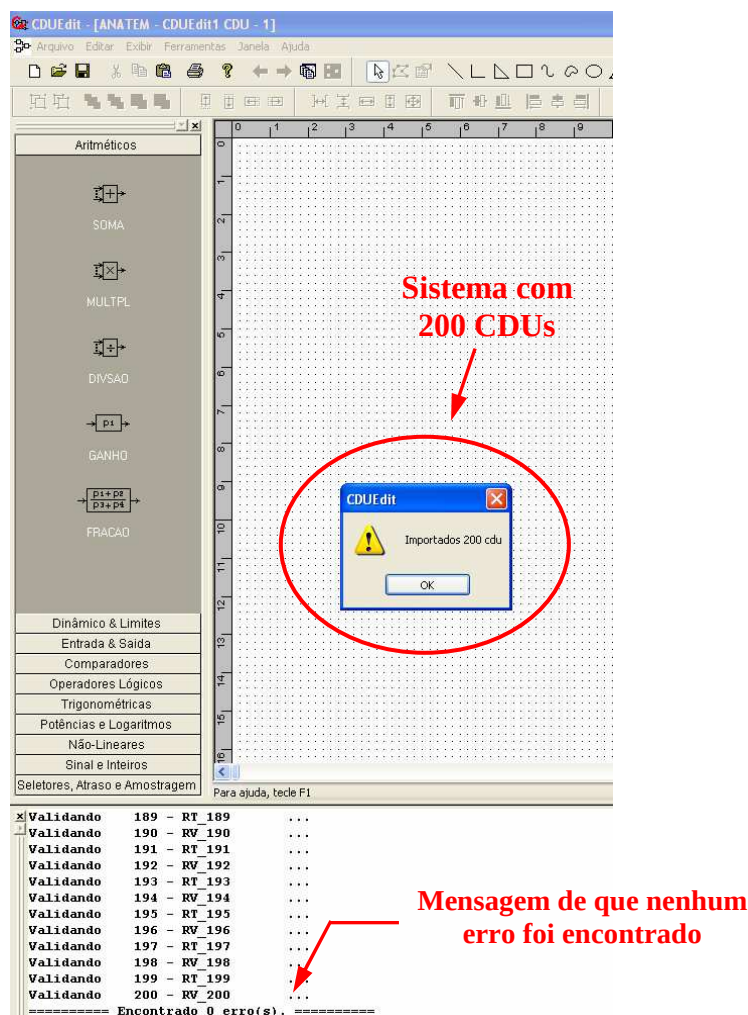


Figura 4.27 – Importando arquivos do ANATEM

Isto é vantajoso porque caso o usuário queria usar um CDU que foi criado pela versão antiga (pelo editor de dados) ele pode abri-lo por esta opção. E a vantagem é que o arquivo a ser aberto será o diagrama de blocos do correspondente CDU. Este desenho poderá então ser editado para melhoria de visualização.

Como no exemplo foi projetado o cdu de número 1, então ao importar o arquivo do ANATEM na lista dos CDUs existentes este tem que ser o primeiro a aparecer. E de fato é isto o que ocorre. A Figura 4.28 mostra o que aparece ao se importar o arquivo, e como podemos analisar este diagrama de blocos é igual ao que foi montado como exemplo (Figura

4.21). Então assim fica fácil se o usuário desejar editar este ou outros CDUs já existentes. Para visualizar os outros diagramas, é só clicar no ícone de seta azul, que está detalhado na próxima figura, ou escolher a opção **CDU** no menu **Editar**, que será aberta uma lista com todos os controladores do arquivo.

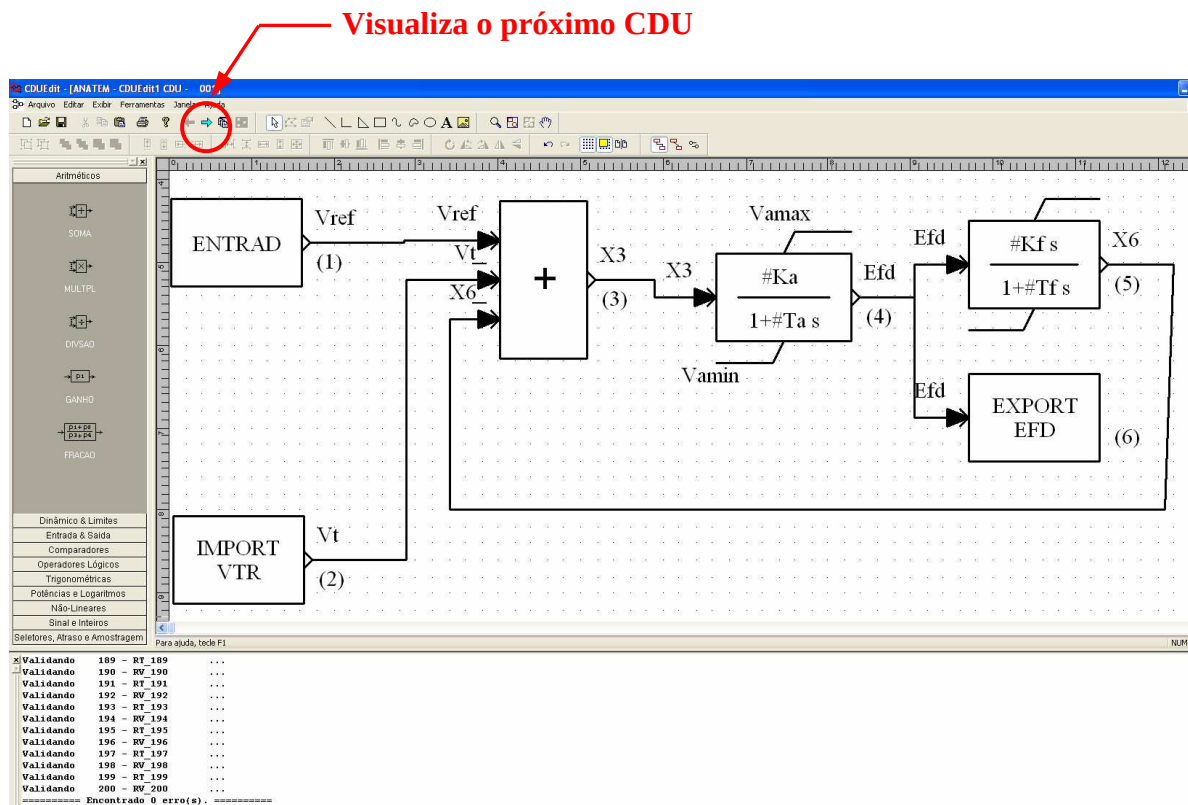


Figura 4.28 – Controlador número 1 importado do ANATEM

Capítulo 5

Conclusões e Sugestões

O estudo de estabilidade de um sistema é de suma importância para as empresas de geração e transmissão de energia elétrica. No setor de operação de uma empresa, por exemplo, é comum a realização de estudos de análise de estabilidade para os quais são importantes ajustes adequados dos diversos controladores que o sistema possui. Com isso, é imprescindível que os engenheiros, que atuam neste setor, detenham meios para projetar adequadamente os parâmetros de diversos tipos de controladores, assim como possuam fundamentos necessários para realizar a análise dos resultados de simulações dinâmicas do sistema e sugerir alterações em ajustes previamente estabelecidos.

O programa ANATEM é um destes meios, utilizado pelas principais empresas do setor. Ele é uma ferramenta efetiva para a realização de simulações do desempenho dinâmico dos Sistemas Elétricos de Potência. No programa podem ser simulados a resposta de um sistema frente a uma perturbação, seguida por operações de abertura e religamento de circuitos e o desligamento de outros elementos.

O programa, com a interface gráfica, trouxe maior facilidade de execução e entendimento das análises dos resultados das simulações. Dessa forma, a partir de estudos utilizando ferramentas computacionais, é possível a tomada de medidas preventivas ou corretivas mais eficientes.

Esta nova versão possui novos módulos gráficos que funcionam em conjunto, o módulo principal é o mais importante, ele controla os dados, executa a simulação e apresenta os resultados. Ele possui um editor de textos com facilidades especiais para utilização com arquivos no padrão ANATEM. Esta interface gráfica (iANATEM) só funciona se no computador do usuário estiver instalado o arquivo executável do ANATEM (Anatem.exe), caso contrário ao tentar abrir algum caso o programa vai retornar um erro informando que não encontrou este arquivo executável. Com isso, uma desvantagem é que para se usar a interface gráfica é necessário ter instalado alguma versão do ANATEM, sendo o iANATEM dependente da versão em DOS.

Aliado a ele tem um módulo de gerenciamento dos gráficos (Plot CEPEL) e um módulo para se projetar e analisar dispositivos definidos pelo usuário (CDUEdit). O primeiro é de grande valia comparado ao Plotgraf, que para se visualizar um resultado era necessário antes converter o arquivo gerado pelo ANATEM. Agora, após se executar a simulação,

automaticamente ao final dela, o Plot CEPEL é aberto com os resultados. Outra vantagem deste programa é a possibilidade de se visualizar o número de gráficos que se desejar, fato que com o Plotgraf não é possível.

Já o CDUEdit é a grande novidade, pois foi o que sofreu maior mudança, trazendo muitas facilidades aos usuários. Com este programa ficou muito mais fácil projetar controladores. A nova ferramenta possui todos os blocos presentes no ANATEM, onde todos os parâmetros são inseridos através de um duplo clique. Após a construção do diagrama basta o usuário exportá-lo para o ANATEM, salvando em *cdu*, e utilizar este arquivo salvo no editor de dados para poder executar a simulação. Com relação aos arquivos já existentes com a antiga versão, estes podem ser utilizados importando-os do ANATEM.

Com estas novas facilidades, esta nova versão deu um salto qualitativo, aumentando a eficiência do programa, desde a criação e edição dos dados até a análise dos resultados. Fatos que antes não eram possíveis com a versão em DOS, como a simulação de dois sistemas ao mesmo tempo, podem ser executados.

Outra grande funcionalidade para as empresas de grande porte é a possibilidade de se cancelar uma simulação de um grande sistema ao longo dela. Com a opção de plotagem automática, se for notado que algo está errado nos resultados é possível cancelar na mesma hora, ao invés de esperar por horas a simulação terminar.

Mas apesar destas grandes melhorias, cabe ressaltar que a entrada de dados, do sistema e do distúrbio, ainda são feitas via linha de comando, no arquivo de extensão *stb*. Isto requer uma atenção muito grande por parte dos usuários para que não seja inserido nenhum dado de forma equivocada. Logo um sistema de grande porte, que possui inúmeras linhas de comando, é bem susceptível a erro. Com isso, uma sugestão é a criação de uma ferramenta para programação de eventos, evitando a edição linha por linha do arquivo através de códigos dos eventos que se deseja simular, uma tarefa trabalhosa e demorada.

Um detalhe que faltou para o iANATEM é a presença de um ícone de simulação na barra de ferramentas do programa, como existe, por exemplo, no ANAREDE. O programa possui poucos ícones, mas entre eles não tem o principal, que é o de simulação.

Outra sugestão de melhoria é a unificação do ANATEM com sua interface gráfica, o iANATEM, pois atualmente esta versão é somente um meio para facilitar a comunicação entre o usuário e o programa.

Por fim, podemos analisar o quanto estes tipos de programas são importantes para a análise de um sistema elétrico. E, principalmente, pelo fato de o sistema estar em constante

crescimento, é necessário a atualização destas ferramentas, para atender as necessidades dos usuários.

Referências Bibliográficas

- [1] A. de CASTRO, J.C.R.FERRAZ, S.GOMES Jr, R.D.RANGEL, R.BAITELLI – *“Ambiente gráfico para análise de estabilidade eletromecânica em sistemas elétricos de grande porte”*, X SEPOPE, Brasil, 2006. Disponível em: <http://www.anatem.cepel.br/pub.html>
- [2] C.G. da MATA – *“Uma contribuição na análise da estabilidade transitória dos sistemas elétricos de distribuição na presença de geração distribuída”*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Brasil, Agosto de 2005.
- [3] IEEE Task Force on Terms and Definitions – *“Proposed Terms and Definitions for Power System Stability”*, Julho de 1982.
- [4] S.E.M. OLIVEIRA, R.D. RANGEL, L.M.S. THOMÉ, R. BAITELLI, C.H.C. GUIMARÃES – *“Programa ANATEM para simulação do desempenho dinâmico dos sistemas elétricos de potência”*, IV SEPOPE, Brasil, 1994. Disponível em: <http://www.anatem.cepel.br/pub.html>
- [5] R.D. RANGEL, S. GOMES JR., J.C.R. FERRAZ – *Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos – ANATEM, Manual do usuário, V10.04.01*, Maio de 2009.
- [6] C.E.V.M.LOPES – *“Desempenho transitório de sistemas de potência com informação de margem de estabilidade”*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Brasil, Junho de 2006.