

Equivalentes de Redes Elétricas para Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos no Programa ATP

L. C. Zanetta Jr., C. E. M. Pereira, PEA-USP e A. A. C. Arruda, CTEEP

Resumo - O presente projeto tem como objetivo a implementação de um aplicativo para obtenção de equivalentes para a simulação de transitórios eletromagnéticos com o programa ATP.

O aplicativo desenvolvido gerencia as tarefas de obtenção da rede equivalente com as tensões internas dos equivalentes para a terra ajustados de modo a reproduzir aproximadamente os valores de fluxo de potência e tensão de um caso escolhido no formato do programa Anarede.

Essa rede equivalente é obtida a partir de arquivos de entrada no formato Anafas e Anarede, sendo esses programas chamados pelo aplicativo desenvolvido para gerar os equivalentes e executar o fluxo de potência no qual será baseado o ajuste de tensões internas.

Palavras-chave—Equivalentes, curto-circuito, fluxo de potência, transitórios eletromagnéticos.

I. INTRODUÇÃO

A obtenção de equivalentes de curto-circuito de uma determinada região de uma rede elétrica é normalmente uma tarefa árdua, mas indispensável para que se possa realizar estudos de transitórios eletromagnéticos com programas como o ATP.

Essa dificuldade ocorre, pois ao contrário do que ocorre com os programas de curto circuito e fluxo de potência, como o Anafas e o Anarede, nos quais o sistema completo é modelado e utilizado nos cálculos, no programa ATP é inviável o modelamento e simulação de todo o sistema, em termos de disponibilidade e tempo de preparação dos dados e também devido à capacidade do programa ATP e tempo de processamento.

Conforme o número de barras que se deseja equivalenter, a tarefa de obtenção dos equivalentes e ajuste das tensões internas de forma a aproximar o fluxo de potência obtido no ATP ao fluxo de potência obtido a partir do caso Anarede, pode demorar vários dias ou mesmo semanas, e no caso de alteração no conjunto de barras retidas, no caso de fluxo, no ano do caso, etc., essa tarefa tem que ser repetida.

O aplicativo desenvolvido busca facilitar essa tarefa mesmo não a tornando imediata, pois algumas etapas e decisões como elaboração dos diagramas unifilares da região em es-

tudo, para a rede representada no Anafas e no Anarede e a definição do conjunto de barras retidas, devem ser feitas de forma cuidadosa e criteriosa pelo engenheiro. No entanto, a partir daí, o aplicativo obtém os equivalentes e os ajustes de tensões internas automaticamente, conforme será apresentado nos itens posteriores.

II. METODOLOGIA DO APLICATIVO

Para o cálculo dos parâmetros do equivalente, é utilizado um arquivo de dados no formato do programa Anafas, do CEPEL. Para o ajuste das tensões internas dos equivalentes, é utilizado um arquivo de dados no formato Anarede, compatível com arquivo Anafas.

Esses arquivos de dados, que compreendem todo o sistema brasileiro, podem ser obtidos na base de dados do ONS. Entretanto a única exigência para os arquivos de fluxo e curto é que sejam coerentes (representam a mesma rede) e estejam no formato do Anarede e do Anafas.

A saída do programa é um arquivo em formato ATP, contendo as impedâncias calculadas dos equivalentes para a terra e das transferências e também as fontes de tensão interna atrás das impedâncias equivalentes para a terra.

Esse arquivo deve ser incorporado ao arquivo contendo os elementos da rede que serão representados normalmente no estudo de transitórios no programa ATP.

O diagrama de blocos global do aplicativo, apresentado na figura 1 mostra de forma simplificada a metodologia e o funcionamento do aplicativo.

Os equivalentes são calculados inicialmente pelo programa Anafas, a partir de uma lista de barras informada pelo usuário. Entretanto, para o cálculo dos equivalentes para a terra devem ser procurados outros elementos para a terra conectados às barras fronteiras para serem colocados em paralelo com o equivalente calculado. Isso se deve ao fato de o Anafas não incorporar no equivalente os elementos para a terra conectados às barras que terão o equivalente calculado, mas em casos em que, por exemplo, há um gerador conectado à barra com equivalente, esse gerador deve ser colocado em paralelo com o equivalente para ter-se somente uma impedância e não duas.

Para o cálculo dos equivalentes, deve ser passada ao programa Anafas uma lista com as barras retidas, ou seja, as barras fronteiras e as barras que continuarão a ser representadas nos estudos.

Este trabalho foi financiado pela Cteep – Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista.

L. C. Zanetta Jr. trabalha no LSP-USP Laboratório de Sistemas de Potência da Escola Politécnica da USP (e-mail: lzanetta@pea.usp.br).

A. A. C. Arruda trabalha na Cteep – Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista.

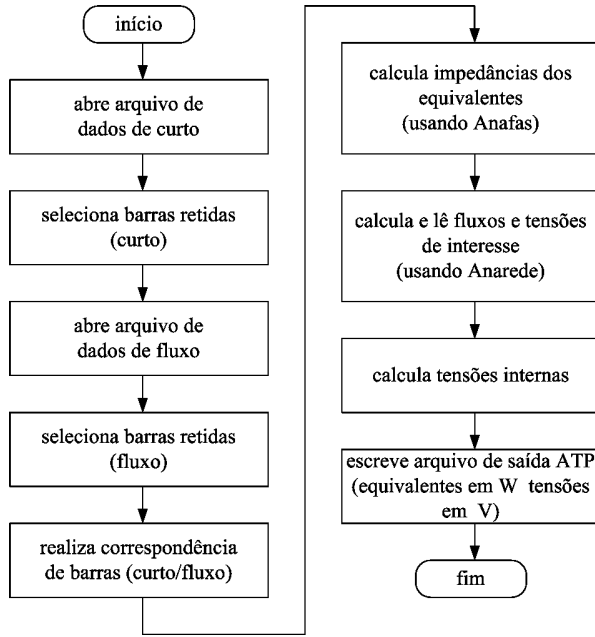


Fig. 1. Diagrama de blocos do aplicativo.

- *Cálculo das tensões internas*

Para que nos estudos com o programa ATP, com a rede retida, na condição de regime, haja coincidência ou semelhança nos valores de tensões nas barras e nos fluxos das linhas quando comparados aos valores obtidos no programa Anarede, é necessário que se calculem as tensões internas dos equivalentes com base nos resultados do programa Anarede, para a rede completa.

O aplicativo desenvolvido roda o fluxo usando o arquivo Anarede da rede completa, gerando uma tabela com as tensões e fluxos que saem das barras retidas informadas pelo usuário. Os resultados contidos nessa tabela, juntamente com os valores calculados a partir do arquivo Anafas são usados para o cálculo das tensões internas.

A tensão interna dos geradores conectados em cada barra com equivalente para a terra é calculada da seguinte forma:

$$e_i = v_i + z_i \left(\sum_{j=1}^n \frac{v_i - v_j}{z_{ij}} + \frac{s_{ij}^*}{v_i} + \frac{s_i^*}{v_i} \right) \quad (1)$$

*: complexo conjugado

e_i : tensão interna na barra i

i : barra com equivalente para a terra

n : número de barras retidas

v_i : tensão na barra i (calculada pelo Anarede)

v_j : tensão na barra j (calculada pelo Anarede)

s_{ij} : fluxo entre as barras i e j (calculado pelo Anarede)

s_i : carga na barra i (dado de entrada do Anarede)

z_{ij} : transferência entre as barras i e j (calculada pelo Anafas)

z_i : equivalente para a terra na barra i (calculada pelo Anafas)

A somatória é a corrente total que passa pelo gerador equivalente, incluindo o fluxo nas ligações, as correntes nas transferências e as cargas.

No cálculo das somatórias, o programa verifica se a ligação z_{ij} existe e se o fluxo s_{ij} também existe.

O cálculo é feito em pu e as tensões internas são convertidas em valor de pico fase-neutro, para serem incorporadas no arquivo ATP que representa os equivalentes.

$$E_i = |e_i| V_b \sqrt{\frac{2}{3}}, \quad \theta_i = \angle e_i \quad (2)$$

A numeração de barras, indicada na expressão como sendo de 1 a n na verdade pode ser diferente, pois a numeração de barras nos arquivos do Anarede e Anafas não segue nenhuma regra clara e nem mesmo tem correspondência entre si.

No caso de haver transferência entre barras de tensão diferente, o aplicativo divide por dois a impedância em pu e corrige cada uma dessas parcelas de acordo com a tensão de cada barra sendo que cada um desses trechos é conectado por um transformador ideal com relação de transformação conforme o valor de tensão de base das barras conectadas por essa transferência.

III. APLICATIVO DESENVOLVIDO

O aplicativo foi desenvolvido na plataforma Delphi, possuindo interface amigável e sendo de fácil utilização.

O objetivo do programa é fornecer a rede equivalente ajustada para simulação de condições transitórias no programa ATP.

A. Entrada e saída do programa

1) Arquivos de entrada

Os arquivos de entrada necessários para utilização do programa são o deck do programa Anafas e o deck correspondente no formato Anarede texto. Do arquivo Anafas, o programa obtém os equivalentes de curto-circuito, e do arquivo Anarede, o programa obtém os valores de fluxo de potência e tensões nas barras para o cálculo da tensão interna dos equivalentes para a terra.

2) Arquivos de saída

O arquivo de saída principal é gerado no formato ATP e contém as impedâncias equivalentes para a terra, as transferências e as tensões fase-neutro de pico dos geradores atrás das impedâncias equivalentes para a terra, os valores das grandezas nesse arquivo são Ω e V . Esse arquivo pode ser incluído ou ter seu conteúdo copiado no arquivo ATP com a rede retida.

O programa também gera um arquivo de saída com informações dos decks utilizados e de barras retidas.

3) Barras retidas

As figuras 2 e 3 apresentam respectivamente uma rede exemplo com 8 barras e rede retida de 6 barras com os equivalentes que seriam gerados pelo aplicativo.

Para esse exemplo, deve ser gerada uma lista de barras retidas contendo as barras 2 a 6.

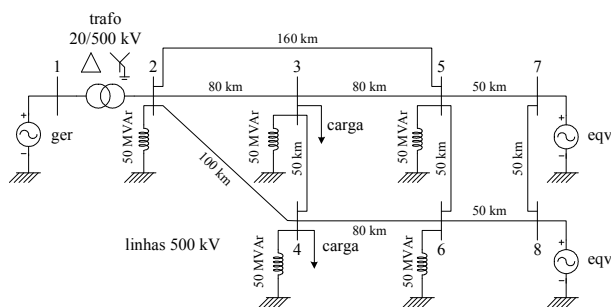


Fig. 2. Rede exemplo com 8 barras.

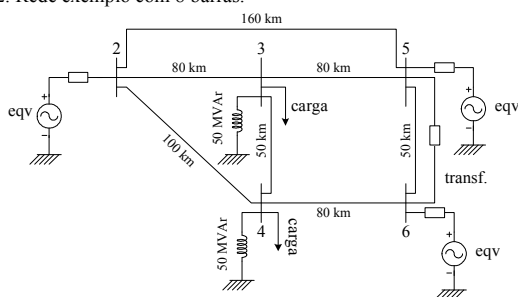


Fig. 3. Rede retida com 6 barras e equivalentes gerados.

IV. UTILIZAÇÃO DO APLICATIVO

A descrição da utilização do aplicativo usará como base na seguinte rede retida, com o programa sendo utilizado para gerar os equivalentes para a terra e transferências nas 5 barras de 440 kV e nas barras de 138 kV Tr. Branca, Bauru (2 barras) e Bariri.

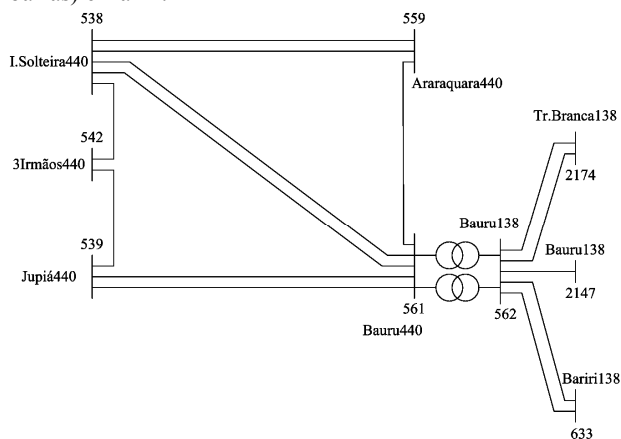


Fig. 4. Rede retida com 9 barras, representação no Anarede.

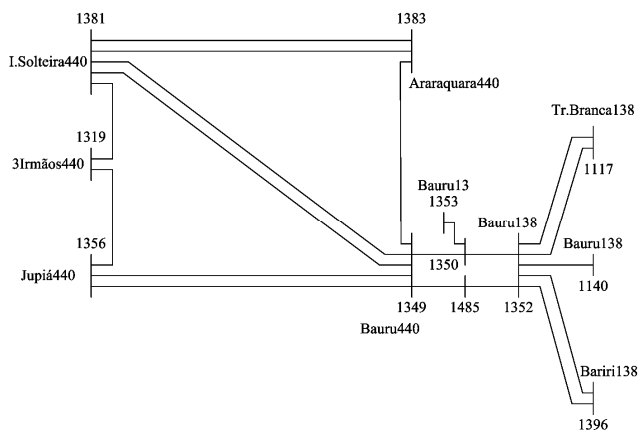


Fig. 5. Rede retida com 9 barras, representação no Anafas.

Na representação do Anafas existem 3 barras a mais que no Anarede (1353, 1350 e 1485), que são barras internas e/ou terciário de transformadores de 3 enrolamentos. Essas barras devem ser retidas para que não sejam geradas transferências entre as barras 1349 e 1352.

Nos itens a seguir são descritas as etapas de utilização do programa.

A. Abertura do arquivo Anafas

A primeira etapa para utilização do programa é abrir o arquivo Anafas correspondente à rede completa. Pode ser usado o menu *arquivo*, *abrir anafas* ou o botão *Anafas*.

A tela inicial do programa e a tela de abertura de arquivo Anafas são as seguintes:

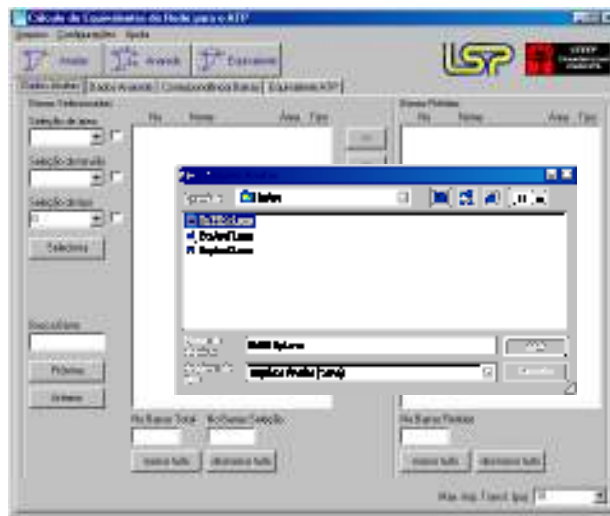


Fig. 6. Tela inicial do programa e tela de abertura do arquivo Anafas.

Após ser carregado o arquivo Anafas, devem ser escolhidas as barras da rede retida a partir da lista de barras obtida do arquivo Anafas. Para auxiliar a escolha de barras o programa permite selecionar barras por área e/ou tensão e/ou tipo, clicando-se na caixa de confirmação, escolhendo o valor desejado na caixa de combinação e em seguida clicando no botão *Seleciona*.

Após o uso do botão *Seleciona*, a lista da esquerda apresenta somente as barras que satisfazem à combinação de condições escolhidas.

Na tela a seguir, foram filtradas as barras de 440 kV, por isso o tamanho da lista é 23, já que foram eliminadas da lista as demais barras.

Para a seleção de área, o usuário precisa ter uma lista própria, com correspondência entre número de área e a concessionária correspondente, já que o "deck" do Anafas não traz essa informação. Entretanto, o programa apresenta o número da área de cada barra na lista global, permitindo ao usuário uma condição mínima para identificação do número da área, por exemplo, da lista de barras, para arquivo anarede do sistema brasileiro completo, verifica-se que as barras de 440 kV da Cteep são da área 9.



Fig. 7. Tela de dados de barra do arquivo Anafas e seleção de barras retidas.

No arquivo Anafas existem 3 tipos de barra:

- 0: barra normal, com correspondente no arquivo de fluxo;
- 1: barra fictícia (para trafos de 3 enrolamentos);
- 2: barra com gerador.

Para escolha das barras deve-se clicar para marcar ou clicar novamente para desmarcar, na caixa de confirmação ao lado do nome de cada barra. Para facilitar essa tarefa, o programa possui os botões *marcar tudo* e *desmarcar tudo*.

Após haver marcado as barras que se deseja na rede retida, deve-se clicar no botão \gg para incluir essas barras na lista de barras retidas.

Caso se deseje excluir alguma barra da lista de barras retidas, deve-se clicar na caixa de confirmação ao lado do nome da(s) barra(s) a ser(em) excluída(s) e em seguida clicar no botão \ll .

Se por exemplo, após incluir barras retidas de 440 kV, for necessário incluir barras de 138 kV, basta fazer novamente a seleção das barras por tensão e incluir as barras de 138 kV na lista de retidas.

A figura 8 mostra a tela do programa após a escolha das barras retidas de 440 kV.



Fig. 8. Tela de seleção de barras do arquivo Anafas com barras retidas.

Na lista da direita, de barras retidas, foram marcadas as barras que também existem no Anarede, pois o programa precisa ter a correspondência entre as barras nos dois tipos de deck (Anarede e Anafas) para poder fazer o ajuste das tensões internas, onde são utilizadas as impedâncias calculadas pelo Anafas e as tensões e fluxos calculadas pelo Anarede.

B. Abertura do arquivo Anarede

A próxima etapa é abrir o arquivo Anarede correspondente ao arquivo Anafas e que será usado para a obtenção do fluxo de potência na rede retida.

O procedimento para abertura do arquivo, filtragem da lista de barras e escolha de barras da rede retida é o mesmo que para o caso do arquivo Anafas, com a próxima figura mostrando a tela do programa após a seleção das barras retidas.



Fig. 9. Tela de seleção de barras do arquivo Anarede.

Como todas as barras retidas também possuem as correspondentes no Anafas, todas estão marcadas.

Em casos que contenham linhas com derivações (ex: Dohler-Y-138), e essas barras não estejam representadas no Anafas, não se deve marcá-las, pois a quantidade de barras retidas marcadas deve ser a mesma para o Anafas e o Anarede.

C. Correspondência de barras

Como nem a quantidade e muito menos a numeração e nomes das barras não é a mesma, quando se compara os arquivos Anafas e Anarede, deve ser informado pelo usuário a correspondência de barras retidas comuns aos dois arquivos. Isso é feito na tela correspondência de barras, que para esse caso fica da forma apresentada na figura 10.

O programa tenta automaticamente fazer a correspondência de barras, com base em trechos dos nomes das barras nas duas listas.

A princípio o programa preenche as listas automaticamente, mas em alguns casos, como por exemplo, no caso de alteração de barras retidas após essa tela já haver sido visualizada, pode ser necessário clicar no botão *Atualiza Listas*.

No caso de o programa não fazer a correspondência corretamente, como é o caso da Figura 3.8, pode-se complementar essa tarefa manualmente da seguinte forma.



Fig. 10. Tela de correspondência de barras antes da ordenação.

Para indicar qual barra do Anarede corresponde a qual barra do Anafas, clica-se no nome da barra Anafas (Lista da esquerda) e em seguida, clica-se no nome corresponde na lista da direita (Anarede), para cada barra que se faz esse processo, verifica-se que as barras Anafas e Anarede ficam alinhadas. Isso deve ser repetido para cada barra que está com a correspondência incorreta.

Para o caso da figura 10 bastou acertar a barra Bauru 440, obtendo-se a ordenação.



Fig. 11. Barras após a ordenação.

D. Geração do equivalente

A próxima etapa que o programa realizará, é o cálculo dos equivalentes e o ajuste das tensões internas. Esse processo é iniciado clicando-se no botão *Equivalente* ou no menu *Arquivo, Gera Equivalente*. Para que os arquivos gerados, especialmente o arquivo ATP com os equivalentes e tensões internas, sejam identificados, o programa abre uma tela no padrão arquivo salvar, para que o usuário indique um nome de arquivo.

Esse arquivo com extensão adotada como “.eqa”, conterá algumas informações sobre o caso gerado, como nome dos “decks” utilizados, listas de barras retidas, com correspondência entre Anafas e Anarede e os nomes dos arquivos gerados.



Fig. 12. Tela de escolha do nome dos arquivos de saída.

Após a execução automática do Anarede e do Anafas o programa vai para a tela *Equivalente ATP*.

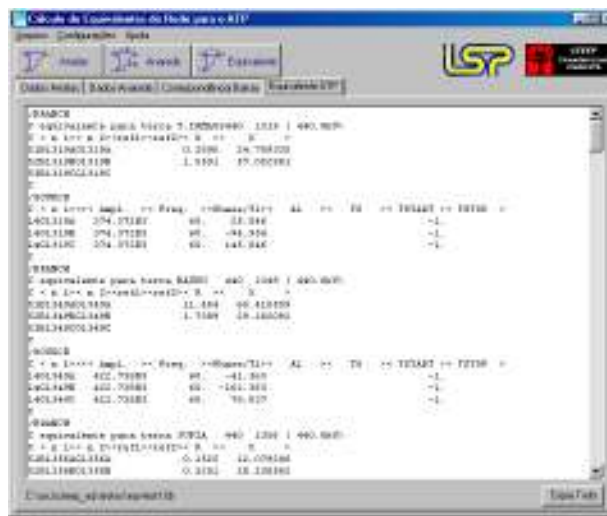


Fig. 13. Tela de exibição do arquivo de equivalente ATP ajustado.

O arquivo de equivalentes ATP gerado *eqvtest1.lib* tem os seguintes tipos de blocos, no qual se observa a identificação de nome, número e tensão nominal da barra:

- Equivalente para a terra**

```

/BRANCH
C equivalente para terra T. IRMAOS440 1319 ( 440.0kV)
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< X >
51B1319AG1319A 0.2890 24.709335
52B1319BG1319B 1.5591 57.052981
53B1319CG1319C
C
/SOURCE
C < n 1><< Ampl. >> Freq. >>Phase/T1>> A1 >> T0
>> TSTART >> TSTOP >
14G1319A 374.372E3 60. 25.046
-1.
14G1319B 374.372E3 60. -94.954
-1.
14G1319C 374.372E3 60. 145.046
-1.
            
```

As tensões mostradas são fase-neutro de pico, dadas em Volts, e as impedâncias estão dadas em Ω.
- Transferência entre barras de mesma tensão**

```

/BRANCH
C transferência T. IRMAOS440 1319 ( 440.0kV) - ILHASOLT440 1381 ( 440.0kV)
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< X >
51B1319AB1381A 19.749 57.873776
52B1319BB1381B 1.1632 15.639355
53B1319CB1381C
            
```
- Transferência entre barras de tensão diferente**

```

/BRANCH
C transferência (T) ARARAQ. 440 1383 ( 440.0kV) - BARIRI 138A 1397 ( 138.0kV)
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< X >
51Y1383AX__1B 5351.3 9343.329600
52B1383BX__1B 182.90 427.507520
53B1383CX__1C
C
51Y__1AB1397B 526.40 919.082484
            
```

```

52Y 1BB1397B          17.992  42.052961
53Y 1CB1397C
C
C <ref1> < I ><flux><btot><rmag>
  TRANSFORMER T__1A
    9999
C < n1 >< n2 > < R >< X ><Vrat>
  1X 1A .00001.00001 440.
  2Y 1A .00001.00001 138.
C <ref1> < I ><flux><btot><rmag>
  TRANSFORMER T__1A T__1B
C < n1 >< n2 > < R >< X ><Vrat>
  1X 1B
  2Y 1B
C <ref1> < I ><flux><btot><rmag>
  TRANSFORMER T__1A T__1C
C < n1 >< n2 > < R >< X ><Vrat>
  1X 1C
  2Y 1C

```

Nesse caso foi considerada metade da impedância em pu na alta tensão e metade na baixa.

E. Simulação no ATP

Para a simulação da rede reduzida, o arquivo ATP deve ter representado os elementos indicados da rede retida, e para a representação da rede equivalente, basta usar a linha `$include c:\xxx\xxx\eqvtest1.lib`, ou simplesmente copiar o conteúdo do arquivo `eqvtest1.lib` (usar o botão copia tudo, na tela *Equivalente ATP*) no arquivo ATP, por exemplo, após os cartões de MISCELANEOUS.

Algumas diferenças podem ter sido causadas por truncamento de algarismos de tensão e fluxo e diferença no modelo de carga (ATP – Z constante, Anarede, P constante) e também por discrepância nos parâmetros das linhas.

Diferenças nos valores de curto, comparando-se resultados do ATP e do Anafas podem ser devidas a diferenças nos parâmetros e ao fato de o Anafas não considerar as capacidades das linhas.

A tabela 1 apresenta a comparação de tensões obtidas com a simulação no ATP da rede retida das figuras 4 e 5 com as tensões obtidas no Anarede.

barra	tensão ATP		tensão Anarede	
	módulo (pu)	fase (o)	módulo (pu)	fase (o)
542 - 3irmaos---440	1.0384	8.542	1.037	8.8
561 - Bauru---440	1.0264	-10.603	1.023	-10.6
539 - Jupia---440	1.0393	7.924	1.037	7.9
538 - Isolteir-440	1.0392	7.544	1.038	7.6
559 - Araraqua-440	1.0249	-14.186	1.023	-14.3
2174 - Tr.Branca138	1.0253	-12.279	0.994	-15.4
2147 - Bauru-P--138	1.0317	-11.953	1.005	-14.8
562 - Bauru---138	1.0328	-11.826	1.008	-14.5
633 - Bariri---138	1.0311	-11.377	1.010	-13.2

Tabela 1 – Comparação de tensões.

Os valores de fluxo ficaram relativamente próximos aos obtidos no Anarede.

As diferenças de resultado entre o ATP e o Anarede são devidas principalmente a discrepâncias entre os parâmetros das linhas da rede retida utilizadas nos dois programas.

As tabelas 2 a 4 mostram a comparação de resultados de fluxo e curto-circuito (ATP x Anarede x Anafas) para a rede reduzida da figura 2, valendo destacar que os dados utilizados foram os mesmos nos programas ATP, Anafas e Anarede, sendo a única diferença de modelamento entre eles, a ausência de capacitâncias no arquivo Anafas.

barra	tensão ATP		tensão Anarede	
	módulo (pu)	fase (o)	módulo (pu)	fase (o)

2	1.0163	0.2	1.017	0.3
3	1.0137	-1.11	1.014	-1.0
4	1.0127	-1.27	1.013	-1.2
5	1.0115	-0.66	1.012	-0.6
6	1.0088	-0.57	1.009	-0.5

Tabela 2. Comparação de tensões.

de	para	fluxo ATP		fluxo Anarede	
		P (MW)	Q(MVAr)	P (MW)	Q(MVAr)
2	3	225.6	-42.6	223.2	-43.3
	4	201.9	-51.3	199.9	-52.4
	5	75.6	-87.6	76.8	-86.8
5	2	-75.3	-121.2	-76.7	-121.9
	3	74.7	-78.6	69.6	-80.9
	6	-21.7	11.4	-19.9	7.0

Tabela 3. Comparação de fluxos.

Algumas diferenças podem ter sido causadas por truncamento de algarismos de tensão e fluxo e diferença no modelo de carga (ATP: Z constante, Anarede: P constante).

barra	curto ATP		curto Anafas	
	trifásico (kA)	fase-terra (kA)	trifásico (kA)	fase-terra (kA)
2	9.61	9.99	9.57	9.86
3	9.74	8.27	9.67	8.04
4	9.66	8.11	9.59	7.86
5	13.96	11.84	13.47	11.21
6	13.61	11.31	12.91	10.42

Tabela 4. Comparação de curto-circuito.

V. CONCLUSÕES

Os objetivos do projeto foram alcançados, com a implementação computacional da rotina “Vector Fitting”, para ajuste das funções de transferência correspondentes aos ensaios, e também com a implementação de um aplicativo computacional, com interface amigável e de fácil utilização, para gerenciamento das tarefas necessárias à obtenção do modelo para simulação no ATP.

Foram realizados vários testes de validação de modelos obtidos com o aplicativo, com resultados altamente satisfatórios em simulações no tempo, com o programa ATP, conforme será apresentado adiante.

A etapa inicial para obtenção do modelo do transformador em altas frequências, é a realização de um ensaio para obtenção da matriz de admitâncias em função da frequência. A próxima etapa é fazer o ajuste dessa matriz com a rotina vector fitting, que fornece as funções de transferência usadas para a implementação do modelo a ser utilizado no programa ATP.

Um dos recursos mais importantes do aplicativo desenvolvido é o modelamento de bancos de transformadores a partir de ensaios de trafos monofásicos, para qualquer tipo de ligação, permitindo inclusive acesso ao neutro no caso de ligação em estrela.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ATP – *Alternative Transients Program*, Leuven, 1982.
- [2] Cepel – *Anarede – Programa de Análise de Redes*.
- [3] Cepel – *Anafas – Programa de Análise de Falhas Assimétricas*.
- [4] Convênio Cteep-Fusp - Equivalentes de redes elétricas para transitórios eletromagnéticos no Programa ATP, *Nota Técnica 2 - Desenvolvimento de Aplicativo de Representação Matemática dos Equivalentes*.