

APRESENTAÇÃO DE UM PROGRAMA PARA CÁLCULO DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS EM MICROCOMPUTADORES SEM OSCILAÇÃO NUMÉRICA E USADO COMO SIMULADOR PARA COMPENSADORES ESTÁTICOS E HVDC

H.W. Dommel

The University of British Columbia

João Roberto Cogo

Escola Federal de Engenharia de Itajubá

J.S.de Sá

Escola Federal de Engenharia de Itajubá

Artigo apresentado no XI SNPTEE, Seminário Nacional de Produção de Transmissão de Energia Elétrica, Grupo XI - Sobre tensões, Coordenação de Isolamento e Interferências - GSI, referência RJ/GSI/11
Rio de Janeiro - RJ/Brasil - 1991

RESUMO

O programa a ser apresentado neste trabalho possui, além dos elementos básicos de análise de transitórios (chaves, elementos R, L e C, linhas, fontes, máquinas síncronas, etc) uma rotina que permite ao usuário desenvolver seu próprio modelo e acoplá-lo a este programa, evitando a necessidade de se ter um programa com número elevado de instruções para análise de casos simples de sobre tensões, faltas, etc.

Os resultados, isentos de oscilação numérica, e o baixo tempo de processamento de um caso são características deste programa, procura-se apresentar ainda o programa como simulador de sistemas com compensadores estáticos, HVDC, etc.

Palavras chaves:

- Oscilação numérica;
- Simulador digital;
- Pontes conversoras (HVDC);
- Compensadores estáticos.

1 - INTRODUÇÃO

Os microcomputadores já fazem parte da rotina normal de trabalho das pessoas e empresas. As empresas vinculadas à área de energia elétrica procuram programas que resolvam os seus problemas mais rotineiros, tenham facilidade de uso, facilidade e simplicidade para a entrada de dados, facilidade e diversas alternativas para a saída de dados e principalmente confiabilidade em seus resultados.

Dentro deste prisma, este trabalho pretende apresentar um programa com estas características na área de transitórios eletromagnéticos, o qual além das aplicações normais deste setor permite aplicações em eletrônica de potência, compensadores estáticos, transmissão de energia elétrica em corrente contínua (HVDC), etc.

Basicamente, a versão original do programa para “Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos”, usando a técnica da integração numérica, teve início na década de 60 com Dommel, H.W., na Alemanha Ocidental [1], [2], [3] onde a primeira versão do mesmo tinha aproximadamente 1500 instruções em FORTRAN.

Novas rotinas foram acrescentadas ao programa original até chegar em torno de 6000 instruções em 1973 na BPA (Bonneville Power Administration).

Na BPA, o programa, basicamente originado por Dommel [3], se desenvolveu com o Dr. W. Scott Mayer e outros engenheiros dos EUA e de diversos países onde ficou conhecido por EMTP (Electromagnetic Transients Program) [3] o qual é utilizado no Brasil desde 1975 sendo que na década de 80 chegou a ter mais de 100.000 (cem mil) instruções FORTRAN uma vez que a filosofia de tal programa é conter todas as rotinas que foram desenvolvidas para as mais diversas aplicações.

Em 1989 foi distribuída no Brasil uma cópia do programa ATP (Alternative Transients Program), através de FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S/A, pelo LEUVEN EMTP CENTER (LEC) o qual é uma versão mais elaborada do EMTP porém pode ser usado em microcomputadores ou computadores de grande porte [4].

Além dos programas mencionados com o objetivo da análise de redes elétricas, existem outros não muito utilizados no Brasil mas nem por isso menos importantes. Entre eles cita-se o NETOMAC [5].

Atualmente, com características próprias para uso em microcomputadores nota-se o aparecimento do programa Microtran [6], objeto de análise e utilização neste trabalho. (Microtran é marca registrada da “Microtran Power System Analysis Corporation”).

Diferentemente dos demais programas, o MICROTRAN procurou manter sua base principal de cálculo de transitórios eletromagnéticos em uma versão de menor porte a qual atende uma grande parcela dos casos práticos e principalmente permite maior rapidez e um melhor aproveitamento das rotinas existentes, o qual é descrito a seguir.

2 - PROGRAMA DE ANÁLISE DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS PADRÃO IBM* PC XT/AT - MICROTRAN [6], [7]

O MICROTRAN é uma nova versão para computador de uso pessoal (microcomputador padrão IBM PC ou PS/2 compatível) do programa de Análise de Transitórios Eletromagnéticos originalmente desenvolvido por Dommel [1], [2], [3].

* IBM é marca Registrada da “International Business Machines INC.”

2.1 - CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS

O MicroTran pode simular os comportamentos transitórios e de regime permanente de sistemas de energia elétrica e de outros tipos de redes elétricas com até 400 ramos e 380 nós. As características do programa incluem modelagem de:

- Elementos R, L e C concentrados;
- Circuitos π (pi) multifásicos);
- Linhas de transmissão de parâmetros distribuídos transpostas e não transpostas com parâmetros constantes;
- Modelos de supressores de surtos e resistências não lineares (incluindo pára-raios tipo óxido de zinco - ZnO);
- Indutâncias não lineares;
- Chaves com vários critérios de chaveamento para simular disjuntores com seqüências múltiplas de fechamento/abertura, diodos, tiristores e outras alterações de conexão da rede, Fontes de tensão e corrente como funções matemáticas padrão (senoides, funções de surto, degraus, rampas), ou ponto a ponto como funções do tempo;
- Máquinas síncronas com enrolamentos de armadura, campo, e amortecedor. O modelo também inclui uma representação de sistema eixo-massa para a simulação de oscilações torsionais;
- Não possui problemas relativos a instabilidade numérica o que é útil para simular sistemas com pontes conversoras, compensadores estáticos e eletrônica de potência;
- Possui rotina de acesso às variáveis do programa a qual permite ao usuário desenvolver outros ou novos modelos de equipamentos elétricos.

A saída dos resultados obtidos visando a análise de transitórios consiste de tensões e correntes (energia ou potência) como funções do tempo. A saída pode ser impressa, armazenada em arquivos ASCII, ou armazenada em forma binária para plotagem posterior.

A configuração da rede e outros dados de simulação são implementados ou modificados pelo usuário num arquivo ASCII num formato pré-definido através de qualquer editor de texto.

2.1.1 - EDITOR ESPECÍFICO MTDATA

Para facilitar ainda mais a entrada de dados, existe o programa de pré-processamento MtData, com ajuda "On Line", que deixa a disposição do usuário uma máscara na tela do microcomputador. Através desta máscara o usuário pode preencher os dados do caso a ser analisado.

Na FIGURA 1 mostra-se um tipo de entrada de dados visando o modelo de transformadores.

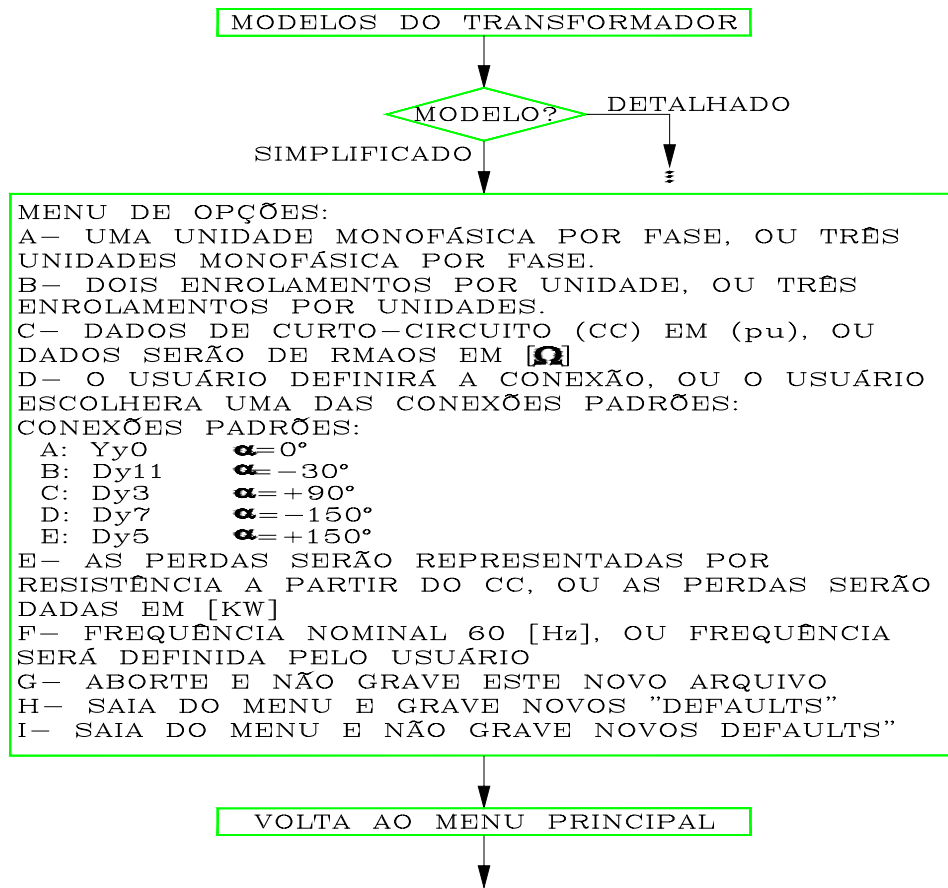


FIGURA 1 - FUXOGRAMA MOSTRANDO UMA DAS OPÇÕES PARA MODELAGEM DE TRANSFORMADORES

Como mostra a FIGURA 1, dentro do menu principal o usuário tem à sua disposição 8 opções e 5 conexões padrões à escolha.

2.1.2 - SAÍDA GRÁFICA - MTPLOT

A visão gráfica dos resultados da simulação é dada pelo programa MTPLOT ou JJ Software. (O MTPLOT utiliza a biblioteca gráfica GRAFMATIC sob licença da Microcompatibles Inc.). Algumas das características de saída gráfica ou por TABELAS incluem, entre outras, possibilidades:

- Dados de até seis arquivos diferentes de plotagem podem ser combinados no mesmo gráfico. Ao mesmo tempo pode-se visualizar até 15 variáveis destes arquivos;
- Escalonamento automático em escalas ou linear, logarítmica, ou semi logarítmica;
- Um cursor “gráfico” que pode ser usado para mostrar os valores das coordenadas x e y de qualquer ponto do gráfico;
- Características de ampliação da imagem (“ZOOM”);
- Acesso ao DOS sem sair do programa de plotagem;
- Determinação dos harmônicos presentes nas formas de onda de tensão ou corrente em um determinado intervalo de tempo;
- Saída gráfica de resultados através de impressoras de diversos tamanhos;
- Determinação das evoluções dos valores eficazes da tensão ou da corrente no tempo;
- I^2t para corrente (visando dimensionamento de fusíveis).

2.1.3 - PARÂMETROS DE LINHA - MTLINE

O programa MTLINE, como parte do MicroTran determina os parâmetros de linha que, entre outras possibilidades destaca-se:

- Cálculo das matrizes de impedância série e capacitância shunt de linhas de transmissão com até 100 condutores aéreos com um arranjo arbitrário de condutores de fase e fios terra;
- Saída em valores de fase, grandezas modais ou como componentes simétricos;
- Eliminação de fios terra;
- Circuitos π equivalentes;
- Cálculo de campo elétrico originadas pelas linhas de transmissão;
- Cálculo das impedâncias mútuas entre as linhas de potência e os circuitos de comunicação para estudos de interferência.

2.2 - MODELOS NÃO DISPONÍVEIS

O programa para Análise de Transitórios Eletromagnéticos MicroTran tem por objetivo ser um programa que resolve a grande maioria dos problemas práticos em engenharia elétrica podendo ainda ser usado para o desenvolvimento de novos modelos.

Como este programa resolve as equações diferenciais representativas do sistema elétrico no tempo durante um intervalo pré-definido, é possível que o usuário desenvolva seus próprios modelos para inserir neste programa usando-se uma de suas sub-rotinas, a CONNEC no caso. A FIGURA 2 ilustra o uso da rotina CONNEC.

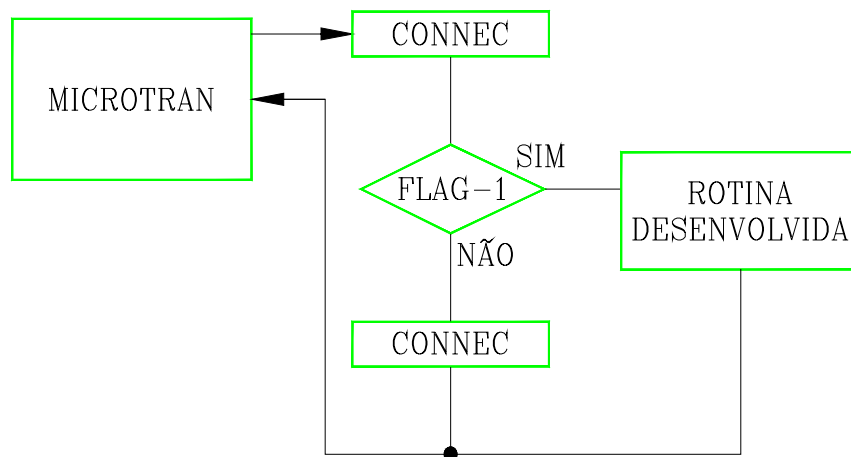


FIGURA 2 - DIAGRAMA DE BLOCOS VISANDO O USO DA ROTINA CONNEC

2.3 - OSCILAÇÃO NUMÉRICA

O programa MicroTran não possui “oscilação numérica”, a qual causa ao usuário menos avisado, interpretação errônea de alguns resultados de simulação [7].

O problema da oscilação numérica tem sido abordado em diversos trabalhos [3], [4], [5], [6] e [7], entre outros.

Alguns trabalhos nesta área procuram mostrar que a tensão de pós-alteração de rede fica melhor representada quando é substituída pela média $u_{t-\Delta t}$ e u_t (tensões antes e depois de uma alteração de rede, respectivamente).

O problema da tomada do valor médio para se obter o resultado mais correto de uma variável em estudo após a alteração da rede está intimamente relacionado com o método de reinicialização de Euler (“Backward Euler”) [7]. Para tanto, admita-se, conforme [7], que se esteja integrando a equação diferencial de uma indutância em algum lugar na rede onde as correntes sejam diferentes de zero, ao invés daquela da indutância em série com a chave abrindo. Se $u_{t-\Delta t}$ tiver sido obtido no ponto A através da interpolação, então a resposta no ponto B (vide FIGURA 3.a) com a regra de integração trapezoidal fica sendo:

$$u_t = \frac{2L}{\Delta t} (i_{t-\Delta t}) - u_{t-\Delta t} \quad (1)$$

Agora admita que se tome os valores médios das tensões e correntes nos pontos A e B, e que a solução seja recomeçada em $t - (\Delta t/2)$, a meio caminho entre A e B. Então,

$$u_{t-\frac{\Delta t}{2}} = \frac{u_t + u_{t-\Delta t}}{2}, i_{t-\frac{\Delta t}{2}} = \frac{i_t + i_{t-\Delta t}}{2} \quad (2)$$

Substituindo as variáveis u_t e i_t da equação (1), na equação (2) produz-se:

$$u_{t-\frac{\Delta t}{2}} = \frac{L}{\Delta t/2} \left(i_{t-\frac{\Delta t}{2}} - i_{t-\Delta t} \right) \quad (3)$$

a qual é exatamente o método de Euler (“Backward Euler”) com o passo de integração valendo $\Delta t/2$. A reinicialização com o método de Euler e o método tomando-se a média de valores em A e B na FIGURA 3.a, a princípio, são idênticos, embora sua implementação em um programa de transitórios possa ser bastante diferente.

Em [7] é citado o método de Euler (“Backward Euler”) de um modo que não requer interpolação entre os pontos 2 e 3 mostrados na FIGURA 3.a para se determinar o cruzamento do zero de corrente. Para entender seu esquema, é importante perceber que as oscilações numéricas ocorrem sempre que houver uma descontinuidade na derivada di/dt nas bobinas ou du/dt em capacitores (alteração na inclinação). Na FIGURA 3.a, com interpolação no ponto onde a corrente é exatamente zero, a inclinação se altera apenas uma vez no ponto A, e com uma etapa do método de Euler (“Backward Euler”), se obterá a solução sobre a alteração da inclinação no ponto

A. Na FIGURA 3.b em interpolação, uma etapa de Euler com metade do passo de integração do ponto 3 (ponto 3 1/2) se obterá a solução sobre a alteração da inclinação no ponto 3. Note, entretanto, que há uma segunda alteração de inclinação no ponto 3 1/2 para a inclinação horizontal quando, no caso, $i = 0$. Portanto, uma segunda etapa de Euler com metade do passo de integração do ponto 3 1/2 ao ponto 4 é necessária para se obter a solução sobre a segunda alteração de inclinação no ponto 3 1/2. O esquema funciona conforme segue:

- Calcule a corrente em cada intervalo de tempo. Tão logo a corrente fique negativa (ponto 3), mude as equações da rede para a posição de chave aberta e encontre a próxima solução com o método de Euler usando um passo $\Delta t/2$ no ponto 3 1/2. Não inclua as respostas na saída;
- Encontre uma outra solução com o método de Euler no ponto 4. Inclua as respostas na saída, que tornará os resultados igualmente espaçados em incrementos de Δt ;
- Após o ponto 4, reverta para a solução regular com a regra trapezoidal de integração.

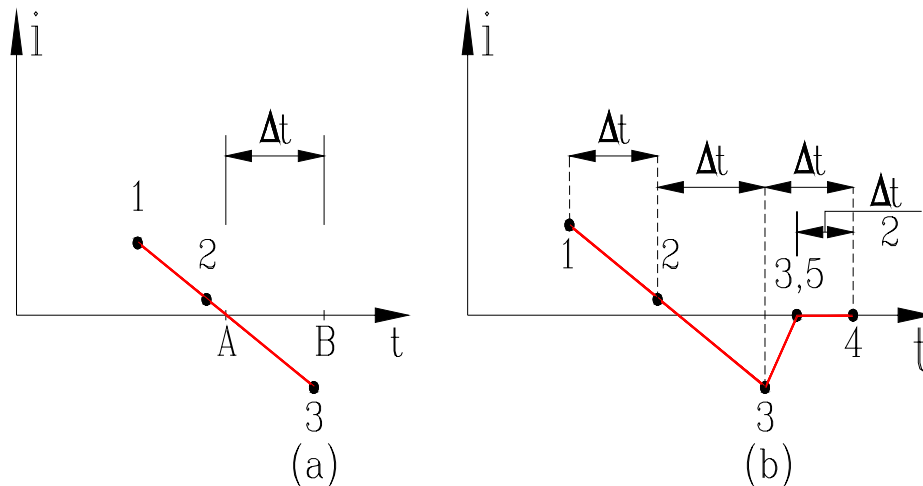


FIGURA 3 - EVOLUÇÃO DA CORRENTE NO TEMPO

- CRUZAMENTO DO ZERO DA CORRENTE NÃO OCORRENDO COMO MÚLTIPLO INTEIRO DO PASSO DE INTEGRAÇÃO;
- ILUSTRAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DO MÉTODO PARA ELIMINAR A OSCILAÇÃO NUMÉRICA.

Note que a matriz de condutância nodal necessária em a e b é idêntica àquela necessária nas etapas de tempo subsequentes em c. Portanto, estas fases adicionais não requerem esforço extra para reconstrução e re-triangularização da matriz de condutância nodal. Este esquema usa um passo com tamanho fixo Δt , que tem algumas vantagens se os resultados forem analisados com Transformada Rápida de Fourier a qual requer espaçamento constante entre dois valores sucessivos da grandeza em análise.

3 - UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA MICROTRAN

3.1 - COMPENSADORES ESTÁTICOS

Para utilizar o programa escolheu-se o sistema mostrado na FIGURA 4, que representa um compensador estático destinado à compensação da variação e/ou flutuação de tensão (“flicker”) na barra de alimentação das cargas elétricas especiais de uma indústria de grande porte alimentada pelo Sistema Elétrico Interligado (SEI) ao nível de 460 [KV]. Apenas para fins de análise considerou-se D1 aberto e em regime permanente (inicialização). O disjuntor D2 abre em $t = 0$, a tensão sobe e o compensador atua. Nestes trabalhos, não se entra no mérito dos detalhes da parte de potência, de eletrônica de potência e do sistema de controle do compensador estático. Detalhes sobre este tipo de sistema podem ser encontrados em [7], entre outros.

As formas de ondas das correntes nos ramos do compensador encontram-se na FIGURA 5.a e a de tensão na FIGURA 5.b.

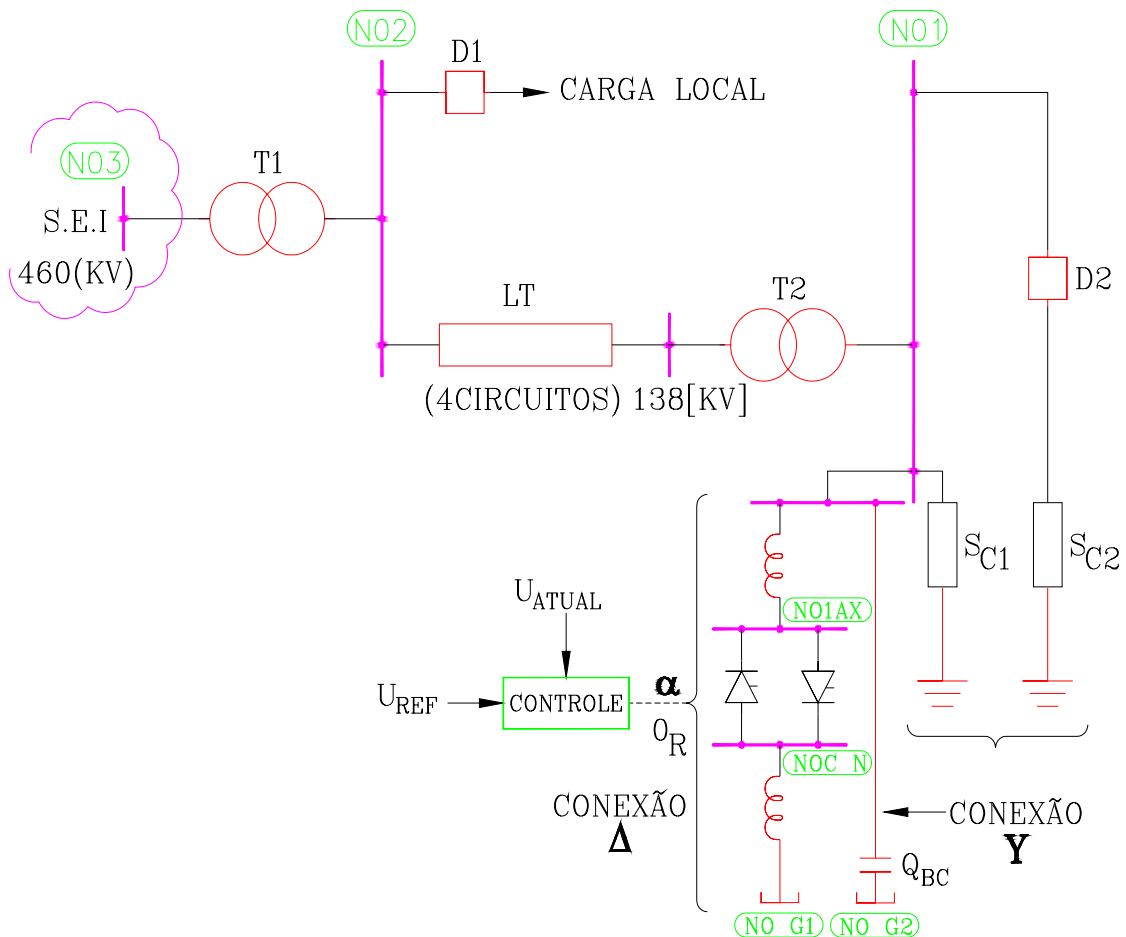
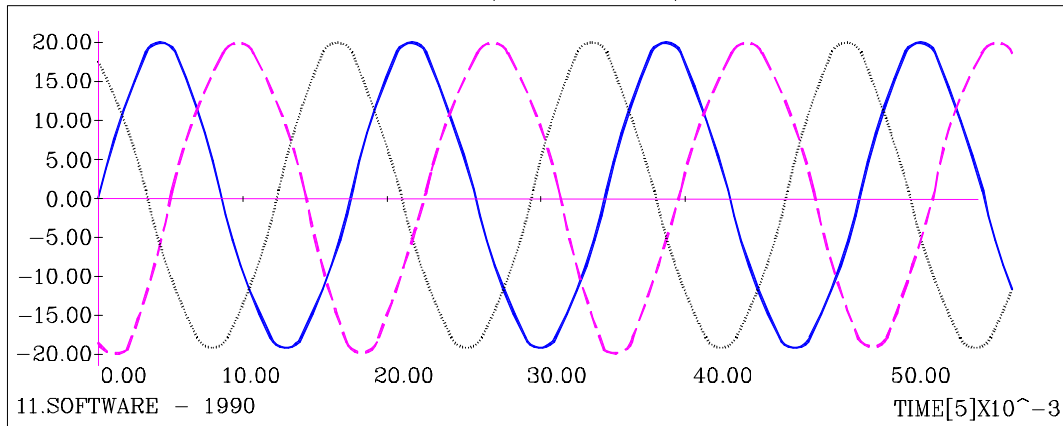


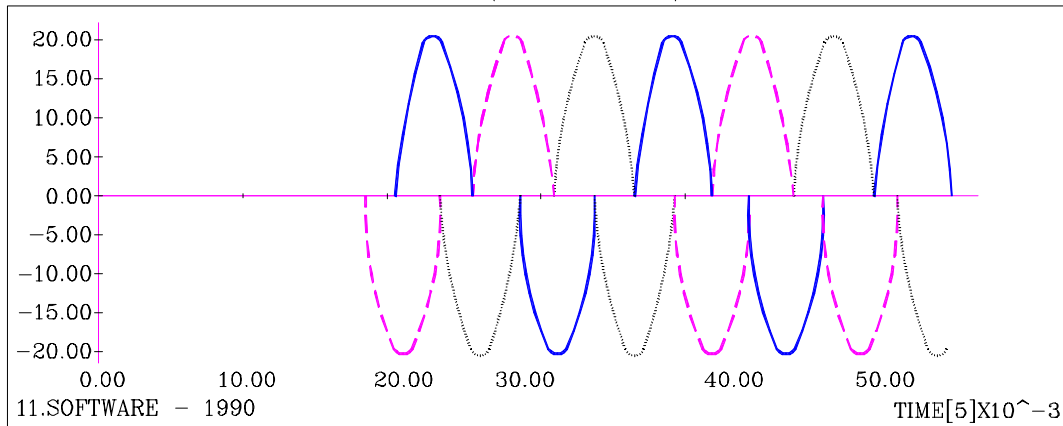
FIGURA 4 - SISTEMA EM ANÁLISE PARA UTILIZAÇÃO DE COMPENSADOR ESTÁTICO

ESTUDO DE UM COMPENSADOR ESTÁTICO (ARTIGO SNPTEE)



NO1A	NO 1B	NO 1C
MAX: 2.10GE+01	MAX: 2.10GE+01	MAX: 1.10GE+01
t[s]: 4.300E-03	t[s]: 9.850E-03	t[s]: 5.540E-02

ESTUDO DE UM COMPENSADOR ESTÁTICO (ARTIGO SNPTEE)



NO1AAX-NO 1B	NO 1BAX-NO 1C	NO 1CAX-NO 1A
MAX: 2.10GE+01	MAX: -1.183E+00	MAX: 1.201E+00
t[s]: 4.300E-03	t[s]: 3.755E-02	t[s]: 5.150E-02

FIGURA 5 - FORMAS DE ONDA DE TENSÃO E CORRENTE PARA O SISTEMA DA FIGURA 4

3.2 - PONTES RETIFICADORAS/INVERSORAS

Como segundo exemplo apresenta-se um sistema (FIGURA 6) com duas pontes conversoras controladas de 6 (seis) pulsos com comutação forçada pela rede (representado parte de um sistema HVDC). As formas de onda de tensão e corrente encontram-se na FIGURA 7. Os harmônicos existentes foram calculados diretamente a partir dos arquivos de resultados que geraram as formas de onda da FIGURA 7. Os harmônicos de corrente e de tensão obtidos encontram-se na TABELA 1 com resultados em por unidade.

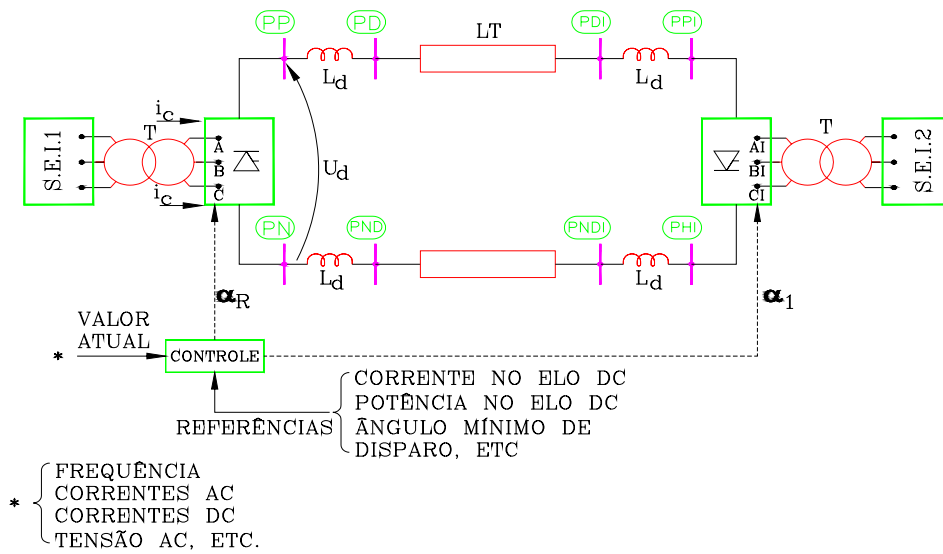


FIGURA 6 - SISTEMA HVDC EM ANÁLISE

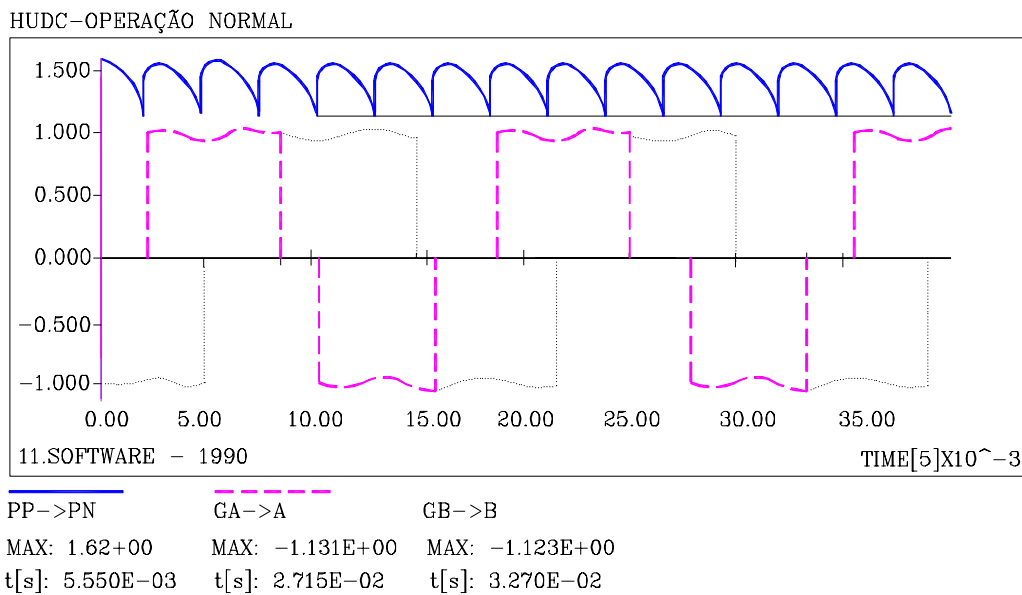


FIGURA 7 - FORMAS DE ONDA DE TENSÃO E CORRENTE PARA O SISTEMA DA FIGURA 6

TABELA 1 - RESULTADOS DOS HARMÔNICOS OBTIDOS. (A - AMPLITUDE, A% - AMPLITUDE EM PORCENTAGEM DE A, F - ÂNGULO DE FASE EM GRAUS)				
		PP → PN (ud)	6A → A (ia)	6B → B (ib)
Base:		1.00000000E+05	1.00000000E-03	1.00000000E+03
Start:		2.33333333E-02	2.33333333E-02	2.33333333E-02
End:		4.00000000E-02	4.00000000E-02	4.00000000E-02
		01.49226354E+00	7.06337480E-03	1.06341646E-02
A		15.96578368E-04	7.66855542E-01	7.69383013E-01
F		262.20	-38.27	81.64
	2	0.00	0.00	0.00
		0.00	0.00	0.00
A%	3	0.00	1.88	1.69
F		0.00	35.77	36.70
	4	0.00	0.00	0.00
		0.00	0.00	0.00
A%	5	0.00	21.24	21.18
F		0.00	-11.89	227.70
A%	6	11.38	0.00	0.00
F		251.32	0.00	0.00
A%	7	0.00	14.80	14.68
F		0.00	85.10	205.27
	8	0.00	0.00	0.00
		0.00	0.00	0.00
	9	0.00	0.00	0.00
		0.00	0.00	0.00
	10	0.00	0.00	0.00
		0.00	0.00	0.00
A%	11	0.00	9.18	9.11
F		0.00	112.22	-7.75
A%	12	5.01	0.00	0.00
F		8.99	0.00	0.00
A%	13	0.00	7.83	7.84
F		0.00	215.80	-23.82
	14	0.00	0.00	0.00
		0.00	0.00	0.00
	15	0.00	0.00	0.00
		0.00	0.00	0.00
	16	0.00	0.00	0.00
		0.00	0.00	0.00
A%	17	0.00	6.07	6.08
F		0.00	239.85	119.87
A%	18	3.21	0.00	0.00
F		135.39	0.00	0.00
A%	19	0.00	5.25	5.28
F		0.00	-17.90	102.89
	20	0.00	0.00	0.00
		0.00	0.00	0.00
	21	0.00	0.00	0.00
		0.00	0.00	0.00
	22	0.00	0.00	0.00
		0.00	0.00	0.00
A%	23	0.00	0.00	4.47
F		0.00	0.00	248.49
A%	24	2.38	0.00	0.00
F		263.62	0.00	0.00

3.3 - SIMULADOR DE OPERAÇÃO DE SISTEMA

A FIGURA 8 mostra através de diagramas de blocos o programa Microtran sendo aplicado em um simulador de testes em relés.

A função do programa Microtran nesta aplicação é efetuar a simulação do sistema elétrico em regimes transitório e/ou permanente e fornecer as formas de ondas de tensão e/ou corrente ao nível dos secundários dos transformadores de tensão e de potencial para o simulador.

Estes sinais de tensão e corrente levados ao Simulador Digital de Testes em Relés (SDTR) são convertidos de digital para analógico e amplificados, para então serem interpretados pelos relés.

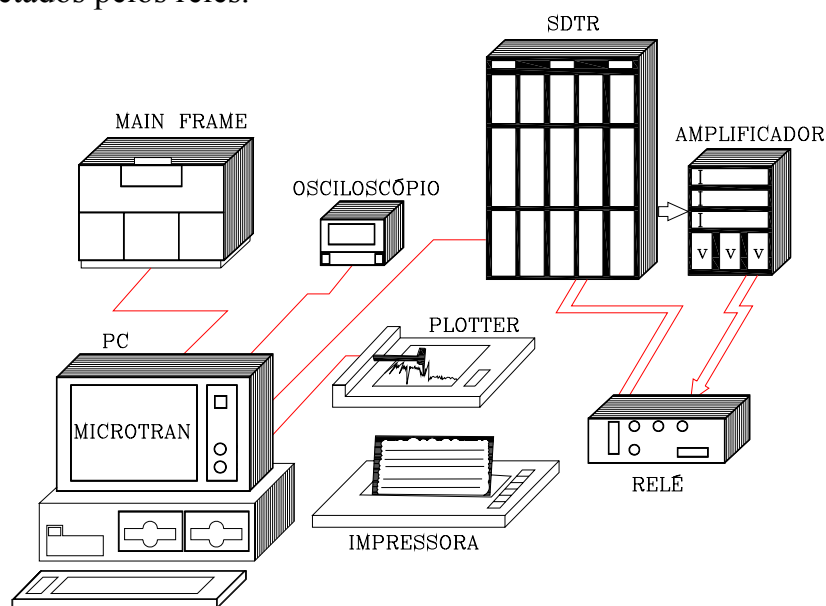


FIGURA 8 - DIAGRAMA DE BLOCOS MOSTRANDO O MICROTRAN VISANDO SIMULAÇÃO DE REDES

OBS.: A FIGURA 8 foi extraída do informativo Técnico Simulador Digital para Testes de Relés (SDTR) da Inepar S/A - Indústria e Construções.

3.4 - SIMULADOR DIGITAL

Este simulador permitirá ao usuário definir a configuração do sistema elétrico a ser estudado, a partir de um menu contendo as configurações básicas disponíveis, de forma totalmente interativa, via tela e teclado de um microcomputador. Esta configuração poderá ser definida a nível de diagrama unifilar e/ou trifilar.

Estando definida a configuração desejada o programa simulador solicitará ao usuário os dados mínimos necessários para a realização da simulação. Uma vez fornecidos estes dados, o programa simulador irá gerenciar automaticamente a execução do programa MICROTRAN.

O programa simulador também deverá estar apto a analisar a consistência dos dados fornecidos pelo usuário, bem como assumir valores característicos, quando possível, para os dados não disponíveis, o que é útil principalmente para os usuários sem experiência em análise de sistemas elétricos.

Dentro desta linha o programa pode ser usado para trabalhar como simulador de sistema de transmissão em corrente contínua (HVDC) e de compensadores estáticos, entre outros. Basicamente, no simulador digital, o usuário via terminal seleciona o tipo de sistema em análise, insere dados mínimos e o programa apresentará as formas de onda selecionadas pelo usuário. A FIGURA 9 ilustra o diagrama de blocos básico utilizado para esta aplicação.

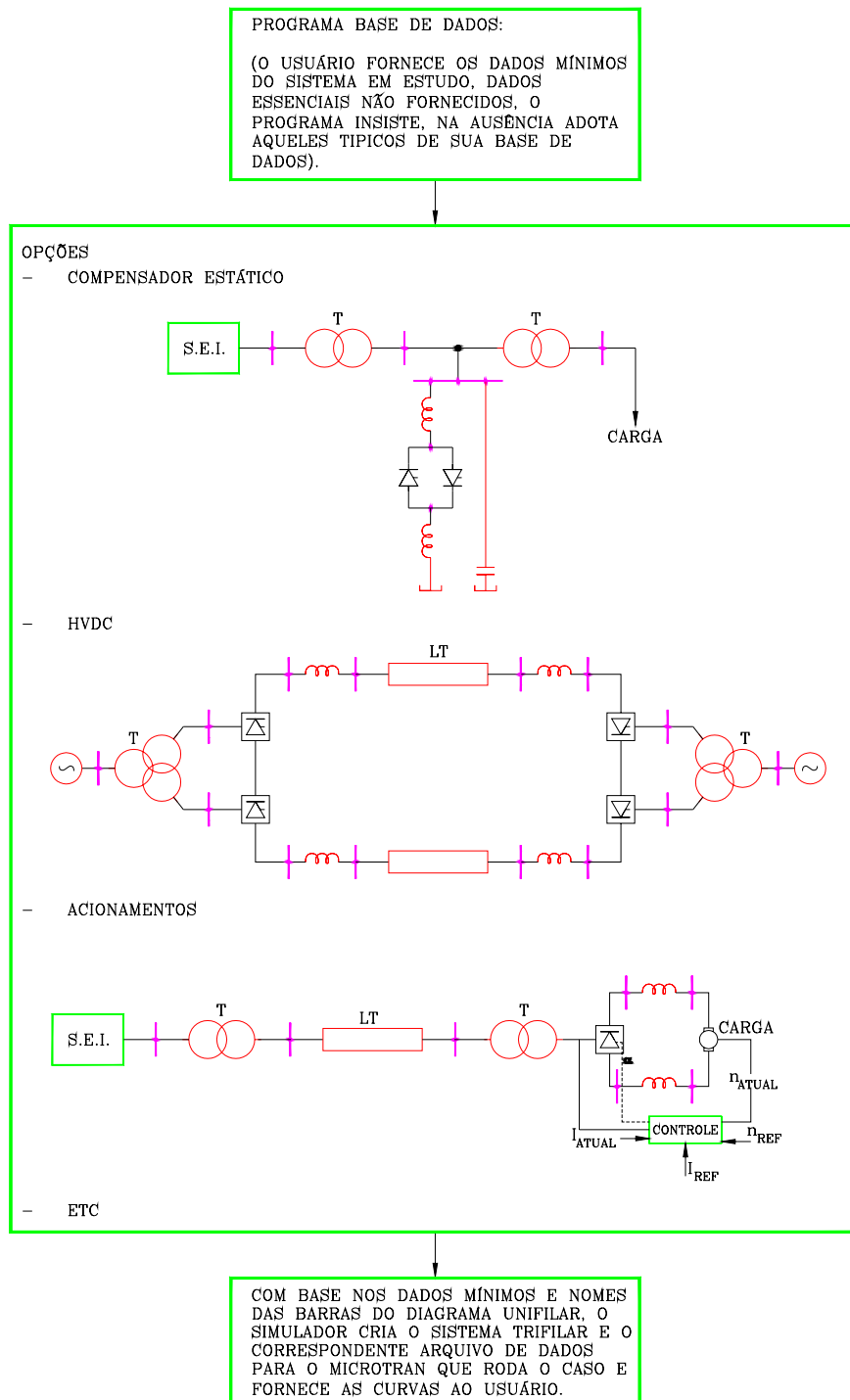


FIGURA 9 - OPÇÕES PARA O SIMULADOR DIGITAL DE UM SISTEMA ELÉTRICO

4 - CONCLUSÕES

Neste trabalho procurou-se apresentar o programa MICROTRAN que além de poder efetuar a Análise de Transitórios Eletromagnéticos, também pode ser operado como um simulador de redes, e de análise de sistema (determinando o nível de harmônicos, as potências ativa, aparente e reativa, fator de potência, etc. quando na presença de cargas elétricas especiais).

Comparações feitas na UBC (“University of British Columbia”) [6] mostraram que o MicroTran foi consistentemente, entre 5 e 10 vezes na média, mais rápido do que os outros programas de análise de redes, dependendo do tamanho e do tipo dos mesmos, podendo ser também considerado devido a entrada de dados com versatilidade como uma ferramenta útil não só a usuários principiantes mas também para os experientes em programas de transitórios eletromagnéticos.

Os resultados apresentados para os dois casos simulados demonstram sem artifícios (não se colocou resistores em paralelo com indutores, resistores em série com capacitores, nem se calculou o valor médio das ondas de saída), que o programa apresentam os seus resultados completamente isentos de oscilações numéricas.

Como o requerimento de hardware mínimo é a exigência de 640 [KB] de memória RAM e disco rígido (winchester) chegando a dispensar inclusive o co-processor matemático aritmético, acreditamos que o programa para as finalidades às quais ele se propõe pode ser de grande utilidade para usuários do setor de energia elétrica dentro das mais diversas aplicações.

5 - BIBLIOGRAFIA

- [1] - DOMMEL, H.W. Programmierung Elektrotechnischer Probleme Beim Einsatz von Digitalrechnern. Bull SEV54 (1963) S.1065/76;
- [2] - DOMMEL, H.W. A Method for Solving Transient Phenomena in Multiphase Systems. Proceedings Power System Computation Conference, Stocholm, 1966 - Report 5.8;
- [3] - Electromagnetic Transients Program (EMTP) Rule Book. Bonneville Power Administration, Portland, Oregon, September 1980;
- [4] - Alternative Transients Program (ATP), Rule Book, Katholieke Universiteit Leuven EMTP Center, Leuven-Heverlee, Belgium, July 1987;
- [5] - KULICKE, B. Simulationsprogram NETOMAC: Differenzenleitwertfahren bei Kontinuierlichen und Diskontinuierlichen Systemen (Simulation Program NETOMAC: Difference conductance method for continuous and discontinuous systems)”. Siemens Forschungs und Entwicklungsberichte - Siemens Research and Development Reports, Vol. 10 (1981), n° 5, pp 299-302;
- [6] - MICROTRAN POWER SYSTEM ANALYSIS CORPORATION. Transients Analysis Program for Personal Computers (Manual de uso do programa MicroTran);
- [7] - DOMMEL, H. W.; COGO, J. R.: - Simulation of Transients in Power Systems with Converters and Static Compensators. Proceedings of the Tenth Power Systems Computation Conference. Graz, Austria, 19-24 August, 1990, pp 215-221.