BENEMAR ALENCAR DE SOUZA

SOBRETENSÕES PROVOCADAS POR DESENERGIZAÇÃO DE REATOR DE ALTA TENSÃO

Dissertação apresentada à Coordenação dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento parcial às exigências para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Processamento da Energia

ORIENTADOR: Prof. Sreeramulu Raghuram Naidu

mpina Grande, Julho de 1981.

S719s Souza, Benemar Alencar de.
Sobretensões provocadas por desenergização de reator de alta tensão / Benemar Alencar de Souza. - Campina Grande, 1981.
91 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1981.
"Orientação : Prof. Dr. Sreeramulu Raghuram Naidu".
Referências.

1. Reator - Alta Tensão. 2. Reator - Desenergização. 3. Sobretensões. 4. Processamento de Energia. 5. Dissertação - Engenharia Elétrica. I. Naidu, Sreeramulu Raghuram. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). III. Título

CDU 621:316.935(043)

CPgEE/CCT-UFPb
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARI A ELÉTRICA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DO MESTRANDO

BENEMAR ALENCAR DE SOUZA

TÍTULO: "SOBRETENSÕES PROVOCADAS POR DESENERGIZAÇÃO DE REATOR DE ALTA TENSÃO"

CONCEITO: Aprovado com Distinção

COMISSÃO EXAMINADORA:

PROF. SREERAMULU RAGHURAM NAIDU - Ph.D
- Presidente -

PROF. DRUMOND X. C. LIMA - Doutor

JOSE AILTON DE LIMA - Engenheiro

Campina Grande, 10 de agosto de 1981

Endereço Postal: Caixa Postal, 518 – 58.100 – Campina Grande – Paraíba – Brasil
Telex: 0832211 – Telefone: DDD (083) - 321-0655 – Ramal 133

RESUMO

Através de simulação digital baseada no método de Dommel, são estudados transitórios causados por corte de corrente que ocorrem quando reatores shunt são desenergizados. Dois meios de amortecimento destes transitórios são analisados: resistor de préinserção e amortecedor RC. São sugeridos valores da resistência de préinserção e dos parâmetros do circuito amortecedor, adequados à redução da sobretensão a nível tolerável. Um modo destas técnicas de amortecimento serem implementadas, é apresentado.

Este estudo se aplica ao reator de compensação da linha *Jaguara-Taquaril* da CEMIG e ao reator da subestação da CHESF em Campina Grande.

ABSTRACT

Digital simulation based on Dommel's method is applied to the study of transient voltages caused by current chopping occurring when shunt reactors are disconected. Two ways of damping these transient voltages are analysed: the pre-insertion resistor and the RC circuit techniques. Values for the pre-insertion resistance and the damping circuit parameters are suggested, which are adequate to reduce the overvoltage to a fair level. A manner of implementing these damping techniques is presented.

This study applies to the CEMIG *Jaguara-Taquaril* line compensation reactor and to the CHESF substation reactor in Campina Grande.

À meus pais e irmãos.

AGRADECIMENTOS

Ao professor S. R. Naidu, pela valiosa orientação;

à CHESF (Companhia Hidrelétrica do São Francisco), pelas informações prestadas;

à Fátima Ribeiro, pelo estímulo e apoio.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO

A confiabilidade de um sistema de potência é julgada pela frequência e duração das interrrupções no suprimento da energia. Isto em grande parte depende do desempenho do sistema em presença de surtos. Nem sempre é economicamente viável ou mesmo tecnicamente possível proporcionar ao sistema, isolamento capaz de suportar qualquer impulso que possa ocorrer. Assim um certo nível de sobretensão é deliberadamente aceito, enquanto dota-se o sistema de meios pelos quais as sobretensões sejam atenuadas, de modo que este limite especificado não seja violado.

A interrupção de uma corrente indutiva relativamente pequena, por um disjuntor, pode ser feita de forma abrupta, provocando algumas vezes sobretensões muito elevadas. Este fenômeno, conhecido como corte de corrente (chopping current) é analisado no Capítulo I, através de um modelo simplificado. Ainda neste capítulo são apresentados alguns meios de amortecimento de tais so-

FIM

bretensões.

O corte de corrente se manifesta no desligamento de transformadores sem carga ou com carga indutiva, de motores e de reatores shunt. Este trabalho trata dos efeitos desta última operação. Dois estudos práticos são realizados. Um sobre o reator de compensação da linha *Jaguara-Taquaril* da CEMIG outro sobre o reator da subestação da CHESF em Campina Grande. Para estes estudos foi utilizado um programa de computador desenvolvido com base no método de DOMMEL (1966, 1969, 1974). O Capítulo II trata detalhadamente dos princípios desta Técnica Computacional. O método de Dommel é considerado sob o ponto de vista prático no Capítulo III.

No Capítulo IV é analisado o amortecimento de sobretensão por ação de resistores de preinserção e amortecedor RC. Uma forma de implementar estes meios de amortecimento é apresentada. Valores adequados a redução da sobretensão a nível tolerável são sugeridos. F

CAPÍTULO I

FENÔMENO DA INTERRUPÇÃO DE PEQUENAS CORRENTES INDUTIVAS

As operações de chaveamento que acontecem em um sistema de potência são várias. Elas tanto podem ser manuais, durante funcionamento normal do sistema, quanto automáticas, posteriores a faltas ou curto-circuitos. Em consequência destas operações aparecem transitórios e em alguns casos elas causam sobretensões elevadas.

As sobretensões oriundas de chaveamento não são críticas para o sistema, desde que não ultrapasse ou mesmo não alcance o nível suportável de impulso de manobra do equipamento deste sistema (*Switching Impulse Withstand Level* ou *SIWL*). O valor crítico da tensão de manobra depende portando do *SIWL*, o qual pode ser escolhido dentre os vários valores dados na publicação *IEC 71-1*. Esta escolha é de importância econômica, visto que o preço do equipamento de alta tensão é principalmente determinado pela tensão suportável especificada. A técnica de coordenação de isolamento é usada para encontrar uma solução ótima, entre os diferentes níveis básicos do *IEC 71-1* e os diferentes níveis de tensão suportável do equipamento.

Se as perspectivas de sobretensão num Sistema de potência estão acima do nível suportável pelo equipamento, o *SIWL* deste equipamento deve ser aumentado (isto porém, torna-se muito caro em alta tensão), ou então as sobretensões devem ser reduzidas a níveis aceitáveis:

a - Por pára-raios ou outros dispositivos;

b - Modificando-se a operação de chaveamento; por exemplo: usando-se resistores de preinserção.

Este primeiro método de redução não pode ser aplicado em todos os pontos do sistema. Assim a coordenação de isolamento requer que a sobretensão seja mantida abaixo de certo nível.

A interrupção de pequenas correntes indutivas é uma das operações que pode provocar surtos de tensão. Esta operação acontece em desligamento de reatores, transformadores sem carga ou carregados com reatores, e motores. Nestes casos a corrente interrompida é pequena, comparada com a corrente de falta no sistema. Ela compreende a corrente magnetizante do transformador, a corrente nominal do reator, ou a corrente de partida do motor ou corrente do motor sem carga. Estas operações acontecem com grande frequência em todos os níveis de tensão, e podem ser de importância econômica.

Em sistema com tensão nominal de 245 KV acima, é sempre necessário compensar a potência reativa de linhas de transmissão longas. O grau de compensação normalmente está entre 50 e 75% da potência reativa *Q* da linha. Sendo

$$Q = U_m^2 \, \omega C \ell = U_m^2 \, \omega \, \frac{\ell}{Z_m v}$$

onde,

U_m = tensão do sistema;

Z_m = impedância de surto de sequência positiva ;

v = velocidade de propagação;

ℓ = comprimento da linha;

C = capacitância por unidade de comprimento.

BURGER (1975) mostra na tab. 1 valores indicativos de impedância de surtos e as potências reativas necessárias para compensação de 50% e 75% da potência em linhas aéreas, em função da tensão nominal.

O disjuntor de alta tensão deve interromper com segurança, todas as correntes, das menores correntes até à corrente de curto-circuito. Em particular, ele deve ser capaz de desligar sem reignição, linhas longas sem carga. Isto requer um rápido aumento na rigidez dielétrica entre os contatos abertos, isto é, um vigoroso jato do meio de extinção. Disjuntores assim, tão ponderosos, tem a propriedade de interromper correntes relativamente pequenas antes ou depois do instante em que a corrente é zero, dependendo do momento em que o disjuntor é acionado. Nos casos de cargas indutivas, tais como reatores ou transformadores carregados reativamente, isto pode dar origem a sobretensões elevadas.

1. Definições.

As definições seguintes, ilustradas na fig. 1, serão usadas neste estudo.

Corrente indutiva: corrente de frequência industrial através de um disjuntor, para um circuito indutivo tendo um fator de potência de 0,5 ou menor.

Corrente indutiva pequena: corrente indutiva tendo uma amplitude consideràvelmente menor que a corrente nominal de curto-circuito.

Instabilidade do arco: qualquer mudança abrupta na condutividade do arco entre os contatos do disjuntor, ocorrendo fora do zero natural e tendo origem nas características do arco e/ou no meio de extinção. (Instabilidade do arco pode aparecer como uma descontinuidade e/ou uma oscilação de alta frequência na tensão e/ou na corrente no disjuntor).

Oscilação de Instabilidade: instabilidade do arco que aparece na corrente como uma oscilação de alta frequência, com um aumento de amplitude durante pelo menos uma parte da oscilação.

Corte de Corrente: interrupção repentina de corrente no disjuntor num instante em que esta corrente de frequência industrial não passa pelo zero. (Corte de corrente pode ser a consequência de instabilidade do arco ou de transitórios no circuito).

Corrente cortada: valores instantâneos de corrente de frequência industrial através do polo do disjuntor em abertura no momento do corte. Esta corrente pode ser diferente daquela através da indutância principal (fig. 2).

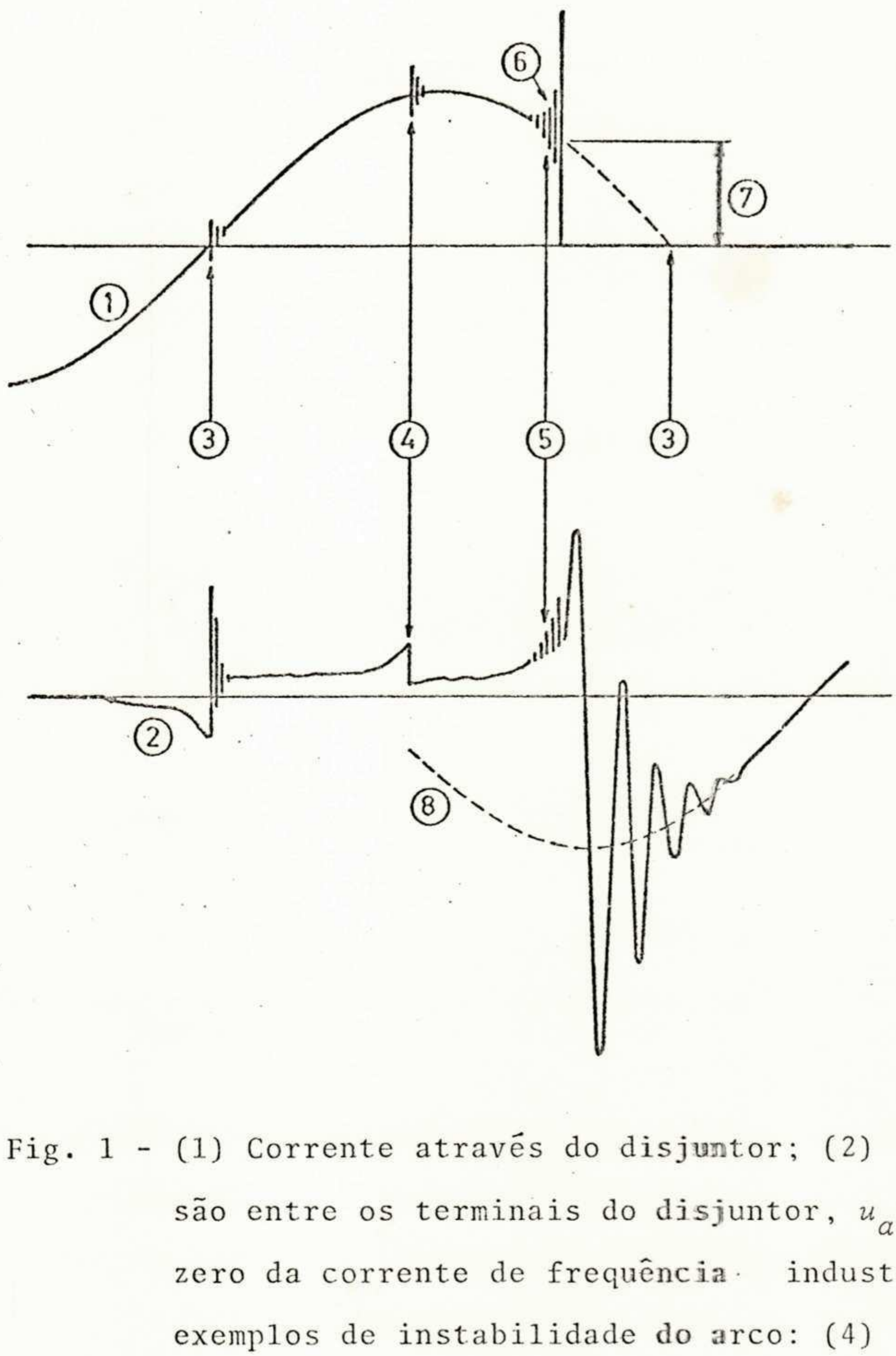


Fig. 1 - (1) Corrente através do disjuntor; (2) tensão entre os terminais do disjuntor, u_a; (3) zero da corrente de frequência industrial; exemplos de instabilidade do arco: (4) não levando a corte de corrente, e (5) levando a corte de corrente; (6) oscilação de instabilidade; (7) corrente cortada, i_{ch}; (8) tensão de alimentação.

2. O Fenômeno de Corte de Corrente.

No momento de interrupção de pequenas correntes indutivas, disjuntores de todos os tipos forçam a corrente a se anular, num instante diferente daquele em que ela passa naturalmente por zero, Para disjuntores a óleo, a ar comprimido e a SF_6, o corte de corrente é geralmente a consequência de uma interação instantânea entre o arco do disjuntor e o circuito externo. Uma típica forma de corrente é mostrada na fig. 2. A partir de um certo nível i_i de corrente, uma oscilação de instabilidade desenvolve-se, a qual leva ao corte de corrente de valor i_{ch}. A frequência é usualmente tão elevada (da ordem de 100 kHz) e a amplitude da oscilação cresce tão rapidamente que se pode considerar o corte como instantâneo.

Quando se trata de interrupção de pequena corrente indutiva, o circuito equivalente simplificado mostrado na fig. 3 pode ser usado como uma primeira aproximação. A indutância L_S e L_t são bastante altas, portanto o circuito externo, que interage com o arco resultando no corte de corrente, é aproximadamente a capacitância C (igual a C_s e C_t em série).

Para arco de disjuntores, o modelo simplificado da fig. 4 pode ser usado (SLAMECKA, 1980). Neste modelo, o arco é suposto com características estáticas:

$$U_a \, i_a^{\alpha} = \eta$$

onde,

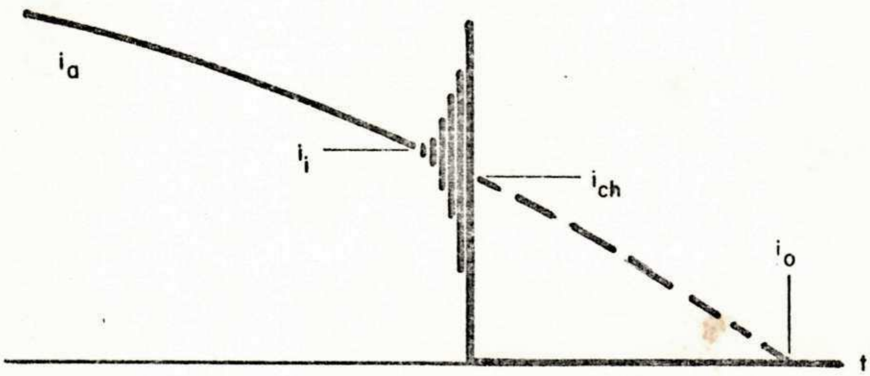


Fig. 2 - Representação esquemática do corte de corrente. i_a corrente do arco, i_i corrente de instabilidade, i_{ch} corrente cortada, i_0 zero natural da corrente.

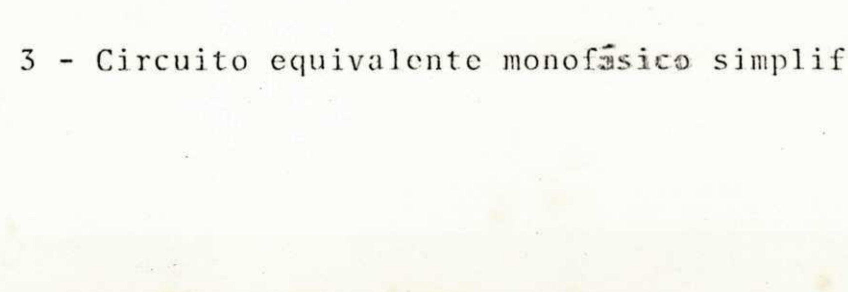


Fig. 3 - Circuito equivalente monofásico simplificado.

U_a = tensão do arco,

i_a = corrente do arco, e

α, η = constantes.

As características estáticas aplicam-se para correntes contínua tanto quanto para corrente alternada, embora mudança rápida da corrente introduza desvios, devido a inércia térmica do arco. Após um pequeno desvio, uma nova condição estacionária é suposta alcançada aproximadamente de modo exponencial, com uma constante de tempo θ. Para tais desvios, o arco pode ser substituido pelo circuito equivalente mostrado na fig. 4b.

No circuito equivalente, R_a é a resistência estática do arco para uma corrente I_a antes da perturbação:

$$R_a = \frac{U_a}{I_a}$$

Por definição

$$R_i = -\frac{\alpha R_a}{(1 + \alpha)}$$

$$L_a = \frac{\theta R_a}{1 + \alpha}$$

A fig. 5 mostra o circuito resultante que determina o limite de instabilidade (indutâncias parasitas tendo sido desprezadas). Pode-se mostrar que a equação diferencial para a corrente i (correspondente ao desvio da corrente do arco em regime permanente) neste circuito é:

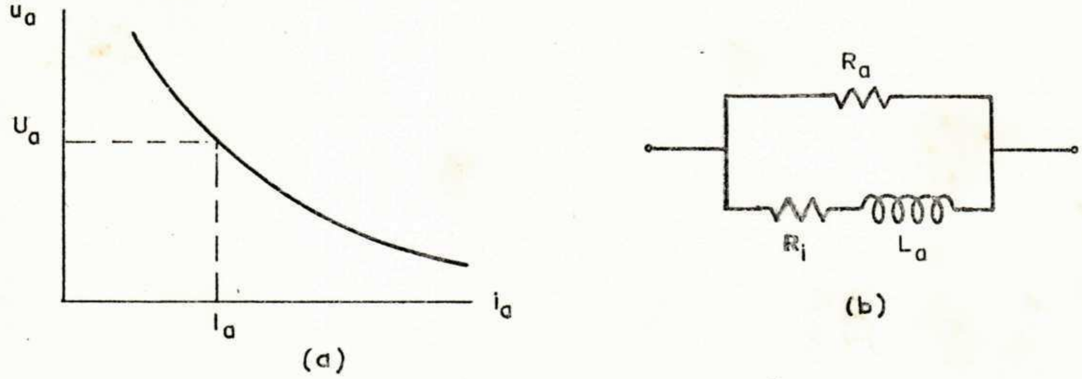


Fig. 4 - Característica do arco e circuito equivalente para pequenos desvios do regime permanente.

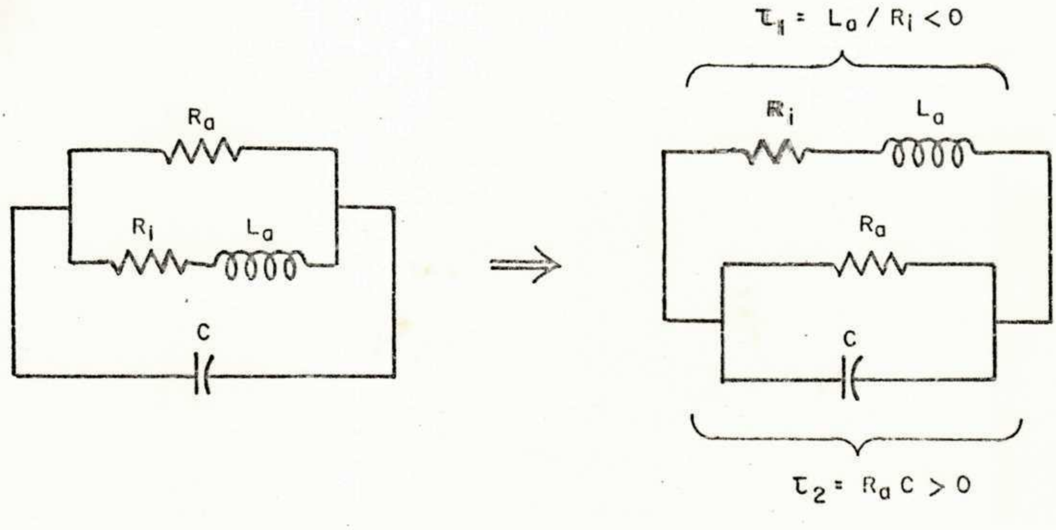


Fig. 5 - Circuito para determinação do limite de instabilidade do arco.

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \left(\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} \right) \frac{di}{dt} + \omega_0^2 i = 0$$

com

$$\tau_1 = L_a/R_i$$

$$\tau_2 = R_a C$$

$$\omega_0^2 = \frac{R_a + R_i}{R_a} \cdot \frac{1}{L_a C}$$

A solução é

$$i(t) = \hat{i} e^{-t/\tau} \cos(\omega_i t + \phi)$$

com

$$1/\tau = 1/2(1/\tau_1 + 1/\tau_2)$$

$$\omega_i = \sqrt{\omega_0^2 - 1/\tau^2}$$

ϕ é o ângulo de fase e $\hat{i}$ é a amplitude da corrente, ambas dependentes das condições iniciais. Se

$$\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} < 0$$

o coeficiente de amortecimento τ é negativo, isto significa que a amplitude da corrente aumentará com o tempo em vez de diminuir. Há portanto uma interação instável entre o arco do disjuntor e o circuito externo.

O modelo simplificado permite explicar o fenômeno razoavelmente. Existem teorias mais esclarecedoras e mais profundas, que porém não são convenientes aqui. Isto porque, o presente estudo é concernente a sobretensões devidas a corte de corrente e não ao corte em si.

3. Sobretensões Devidas a Corte de Corrente.

A intensidade da sobretensão, resultante do corte de corrente num circuito monofásico, é determinada principalmente pela corrente cortada i_{ch}, a capacitância C_t e a indutância L_t da carga. A fig. 6 mostra o mais frequente caso de corte de corrente antes da passagem natural por zero. A tensão na carga aumenta para um primeiro máximo com amplitude U_m; em seguida oscila com uma frequência (tipicamente de 0,5 a 10 kHz) dada pelas características do circuito. A sobretensão é provocada pela liberação da energia magnética armazenada no momento do corte da corrente. É usualmente justificável considerar o corte de corrente como um degrau de corrente instantânea.

Para ilustrar o fenômeno da sobretensão provocada por corte de corrente, o circuito da fig. 7 pode ser usado. Supondo que a corrente é instantaneamente interrompida em seu pico, e que a presença de L_s pode ser negligenciada, a tensão transitória através do reator pode ser obtida:

$$u(t) = \sqrt{2}\, U_0 \frac{\omega_0}{\omega} \operatorname{sen} \omega_0 t$$

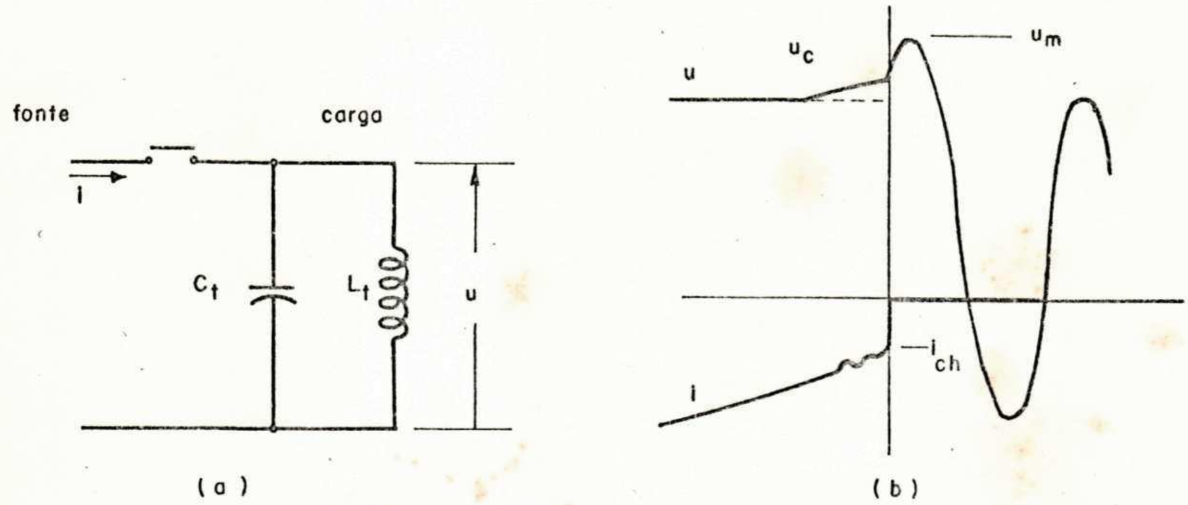


Fig. 6 - Sobretensões no instante de corte de corrente. (a) Circuito equivalente; (b) Corte antes da passagem natural por zero.

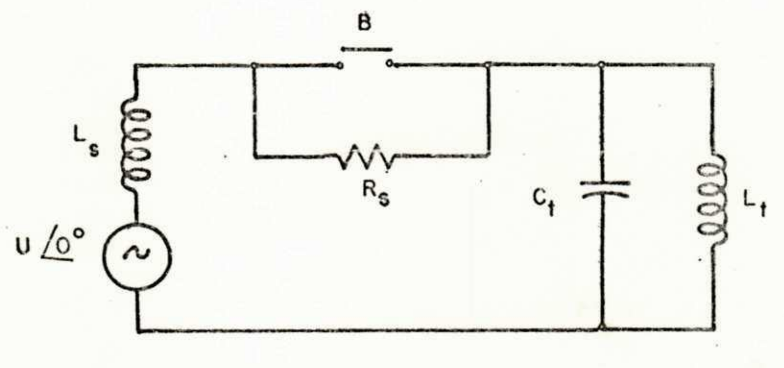


Fig. 7 - Circuito para ilustrar o fenômeno da sobretensão provocada por corte de corrente.

onde

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_t C_t}}$$

A frequência natural ω_0 é muito maior que a frequência da fonte. Portanto, sobretensões muito elevadas podem ocorrer.

Quando um disjuntor é equipado com resistor de preinserção R_s, a tensão transitória através do reator pode ser superamortecida, criticamente amortecida ou subamortecida, respectivamente se $R_s < R_0$, $R_s = R_0$ ou $R_s > R_0$. Sendo

$$R_0 = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{L_t}{C_t}}$$

a resistência de amortecimento crítico. No caso da tensão ser criticamente amortecida

$$u(t) = \sqrt{2}\, U_0 \frac{\omega_0}{\omega} (\omega_0 t e^{-\omega_0 t})$$

O valor máximo do transitório é

$$U_{max} = \sqrt{2}\, U_0 \frac{\omega_0}{\omega} \frac{1}{e}$$

onde e é a base neperiana. A sobretensão devida ao corte de corrente pode ser consideravelmente reduzida por um resistor de preinserção apropriado.

Circuitos trifásicos são mais complicados, especialmente quando a carga indutiva tem indutância mútua. Nestes casos, o cál culo de sobretensões é melhor efetuado através de computador digital.

4. Reignições.

Após a interrupção da corrente, a tensão na carga indutiva passa a oscilar, como foi descrito na secção anterior. Se durante esta oscilação, a tensão suportável do disjuntor é momentâneamente excedida, acontecerá reignição. Uma corrente de oscilação rápida se estabelecerá através do disjuntor, iniciada pela diferença entre as tensões do lado da fonte e do lado da carga do circuito. Tais reignições podem se repetir várias vezes.

Reignições causam troca de energia no circuito. A energia que se encontra no lado da carga do disjuntor é de especial interesse, pois esta energia é responsável pelo possível pico de tensão através da capacitância C_t, isto é, o possível pico de tensão para a terra, no lado de carga do disjuntor depois de cada interrupção.

Sobretensões muito altas podem ocorrer caso haja reignições sucessivas, onde cada reignição aumenta o pico de tensão na carga, pelo aumento da energia armazenada. Esta situação é chamada *escalada de tensão* e pode ocorrer com disjuntores capazes de interromper correntes com alta taxa de variação na passagem por zero. A análise de reignição é complexa e não é considerada neste estudo.

5. Métodos para Amortecimento de Sobretensão.

A análise simplificada da secção 3 sugere alguns métodos para amortecer sobretensões causadas por corte de corrente. O uso dos seguintes métodos permitem este amortecimento:

a - Chaves *load-break* para manobrar reatores;

b - Pára-raios;

c - Circuitos amortecedores em paralelo com o reator.

Chaves *load-break* tem a capacidade de interromper correntes normais, compatíveis com sua corrente nominal, porém elas não podem interromper correntes de faltas. Isto é, o sistema de proteção deve assegurar que tais correntes anormais serão interrompidas por um disjuntor apropriado, antes da chave *load-break* abrir, na tentativa de isolar a falta. A decisão de usar este tipo de chave normalmente deve ser tomada no estágio de planejamento. SARKINEN et alii (1979) apresenta um exemplo de reator manobrado por chave *load-break*.

BURGER (1975) propõe o uso de pára-raios para amortecer sobretensões provocadas por interrupção de pequenas correntes indutivas. Quando reatores são manobrados, as sobretensões geradas podem causar centelhamento do pára-raio repetidamente, e a corrente neste dispositivo pode durar muito mais do que aquela que se estabelece quando ocorre descarga atmosférica. Estudos cuidadosos e detalhados devem ser feitos para se escolher um pára-raio adequado, capaz de dissipar a energia do reator. Atualmente, é possível simular a característica do pára-raio em computador digital.

A terceira alternativa é usar um circuito amortecedor consistindo de um ramo RC série conectado aos terminais do reator Es ta técnica tem sido usada em circuitos de média tensão (DAMSTRA, 1976). O presente estudo propõe a conecção temporária de um ramo RC ao reator, antes do desligamento. Um resistor de preinserção R_s, para o disjuntor, também é sugerido. Valores adequados dos parâmetros do circuito amortecedor são apresentados, depois da simulação digital do transitório devido ao corte de corrente.

CAPÍTULO II

CÁLCULO DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS

Qualquer sistema, monofásico ou polifásico, constituído de resistências, indutâncias, capacitâncias e linhas de transmissão, com parâmetros distribuídos, pode ser resolvido pelo método sugerido por DOMMEL (1966, 1969, 1974). Esta técnica é especialmente adequada para análise de transitórios eletromagnéticos, através de computador digital, a partir de quaisquer condições iniciais. Com este método, é possível se levar em conta dependência da frequência, variação com o tempo, e não linearidade de algum elemento do circuito. O sistema pode ser submetido a qualquer número de chaveamentos sucessivos ou simultâneos.

O método de Dommel é um procedimento recursivo. Partindo-se das condições iniciais, isto é, conhecidas as tensões e correntes nos instantes $t_o - \Delta t$, $t_o - 2\Delta t, \ldots$ o estado do sistema é determinado em $t_o + \Delta t$, $t_o + 2\Delta t, \ldots$ até um especificado t_{max}. O intervalo base de tempo Δt, é fixo. No instante t, os valores de tensões e correntes em $t - \Delta t$, $t - 2\Delta t, \ldots$ já foram determinados; uma parte destes *valores passados*, conhecida como *valores históricos*, é utilizada para determinar o estado atual do sistema.

1. Método de Dommel para Circuitos Monofásicos.

1.1 Linha sem Perda.

Tensão e e corrente i num ponto x ao longo de uma linha sem perda, com indutância L e capacitância C por unidade de comprimento, se relacionam por:

$$- \frac{\partial e}{\partial x} = L \frac{\partial i}{\partial t} \tag{1a}$$

$$- \frac{\partial i}{\partial x} = C \frac{\partial e}{\partial t} \tag{1b}$$

A solução geral destas equações é:

$$i(x,t) = f_1(x - vt) + f_2(x + vt) \tag{2a}$$

$$e(x,t) = Z\, f_1(x - vt) - Z\, f_2(x + vt) \tag{2b}$$

onde f_1 e f_2 são funções arbitrárias das variáveis $(x - vt)$ e $(x + vt)$. Fisicamente, $f_1(x - vt)$ é uma onda progressiva e $f_2(x - vt)$ é uma onda regressiva, que viajam com velocidade

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad ;$$

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \tag{3}$$

é a impedância de surto da linha.

Das equações (2) se obtém:

$$e(x,t) + Zi(x,t) = 2Zf_1(x - vt) \tag{4}$$

$$e(x,t) - Zi(x,t) = -2Zf_2(x + vt) \tag{5}$$

Em (4) a expressão $(e + Zi)$ é constante se $(x - vt)$ for; Do mesmo modo, se $(x + vt)$ for constante, a expressão $(e - Zi)$ em (5) também é. Isto significa o seguinte: Para um observador imaginário, viajando ao longo da linha na direção da onda progressiva com velocidade v, $(x - vt)$, e consequentemente $(e + Zi)$, serão constantes ao longo da linha. Como o tempo de trânsito de um ao outro extremo da linha, de comprimento d, é

$$\tau = \frac{d}{v} = d\sqrt{LC} \tag{6}$$

então a expressão $(e + Zi)$ vista pelo observador quando parte de um extremo em $t - \tau$, é a mesma que encontra quando chega em t, ao outro extremo. Isto é, com respeito a fig. 1,

$$e_m(t - \tau) + Zi_{km}(t - \tau) = e_k(t) + Z(-i_{km}(t))$$

Desta equação resulta

$$i_{km}(t) = \frac{1}{Z} e_k(t) - I_k(t - \tau) \tag{7a}$$

Analogamente,

$$i_{mk}(t) = \frac{1}{Z} e_m(t) - I_m(t - \tau) \tag{7b}$$

onde,

$$I_k(t - \tau) = \frac{1}{Z} e_m(t - \tau) + i_{mk}(t - \tau)$$

$$I_m(t - \tau) = \frac{1}{Z} e_k(t - \tau) + i_{km}(t - \tau)$$

são conhecidas no instante t, uma vez que são uma combinação de valores históricos de tensões e correntes, determinados no tempo $(t - \tau)$. Estas equações na variável t, em vez de $(t - \tau)$ são:

$$I_k(t) = \frac{1}{Z} e_m(t) + i_{mk}(t) \tag{8a}$$

$$I_m(t) = \frac{1}{Z} e_k(t) + i_{km}(t) \tag{8b}$$

substituindo-se nestas equações os valores de $i_{mk}(t)$ e $i_{km}(t)$ dados em (7), resultam as equações:

$$I_k(t) = \frac{1}{Z} e_m(t) - I_m(t - \tau) \tag{9a}$$

$$I_m(t) = \frac{1}{Z} e_k(t) - I_k(t - \tau) \tag{9b}$$

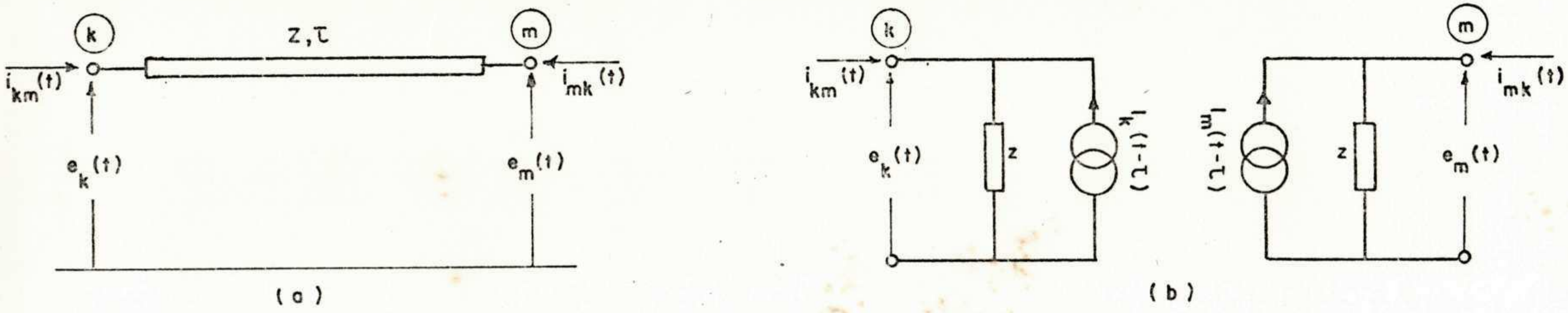


Fig. 1 - (a) Linha monofásica sem perda. (b) Circuito equivalente.

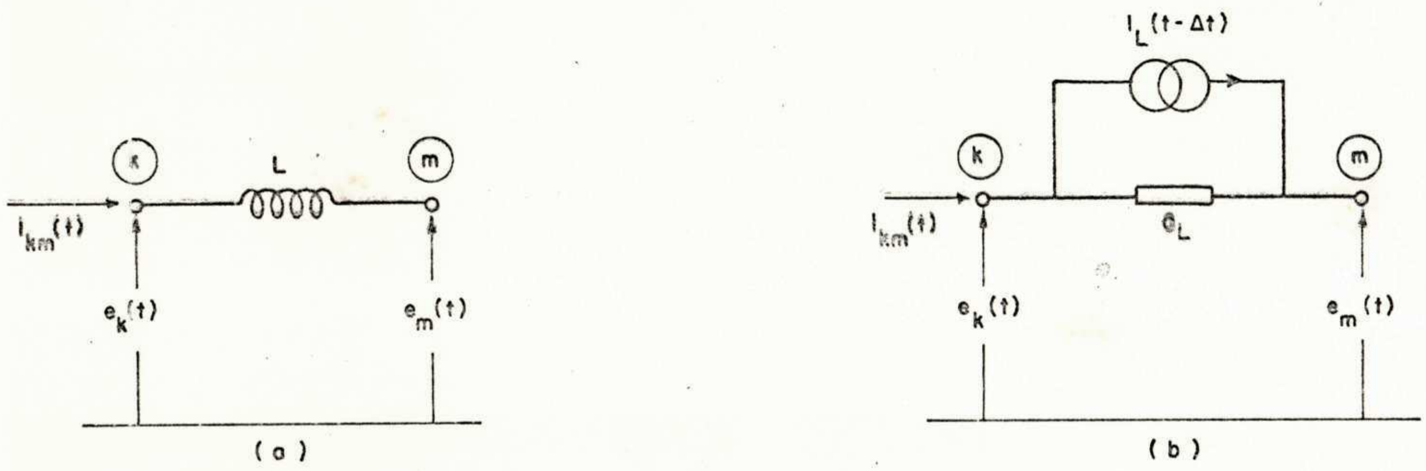


Fig. 2 - (a) Indutância. (b) Circuito equivalente.

com as quais se podem calcular I_k e I_m recursivamente.

A fig. 1 mostra o circuito equivalente, que descreve plenamente a linha, vista nos seus terminais. Lá, I_k e I_m aparecem como fontes equivalentes de correntes. Topologicamente, os terminais não estão conectados; Contudo, as condições em um extremo, são sentidas no outro, com um atraso de τ.

1.2 Indutância.

Para a indutância L da fig. 2,

$$e_{km}(t) = L \frac{di_{km}(t)}{dt}$$

Esta equação pode ser integrada de $t - \Delta t$ a t:

$$\int_{t-\Delta t}^{t} di_{km}(t) = \frac{1}{L} \int_{t-\Delta t}^{t} e_{km}(t)\, dt$$

Usando a regra de integração trapezoidal, resulta:

$$i_{km}(t) = G_L \cdot e_{km}(t) + I_L(t - \Delta t)$$

onde,

$$G_L = \frac{\Delta t}{2L} \tag{10}$$

e

$$I_L(t - \Delta t) = G_L \cdot e_{km}(t - \Delta t) + i_{km}(t - \Delta t)$$

ou evidentemente,

$$I_L(t) = G_L \cdot e_{km}(t) + i_{km}(t) \tag{11}$$

eliminando $i_{km}(t)$ desta equação, então

$$I_L(t) = 2G_L \cdot e_{km}(t) + I_L(t - \Delta t) \tag{12}$$

A fig. 2b apresenta o circuito equivalente do indutor. Lá, I_L é uma fonte de corrente com valor fixo durante cada intervalo Δt.

1.3 Capacitância.

Para a capacitância da fig. 3,

$$i_{km}(t) = C \frac{de_{km}(t)}{dt}$$

Da integração desta equação, de $t - \Delta t$ a t, usando-se a regra do trapézio, resulta

$$i_{km}(t) = G_c \cdot e_{km}(t) - I_c(t - \Delta t)$$

onde,

$$G_c = \frac{2C}{\Delta t} \tag{13}$$

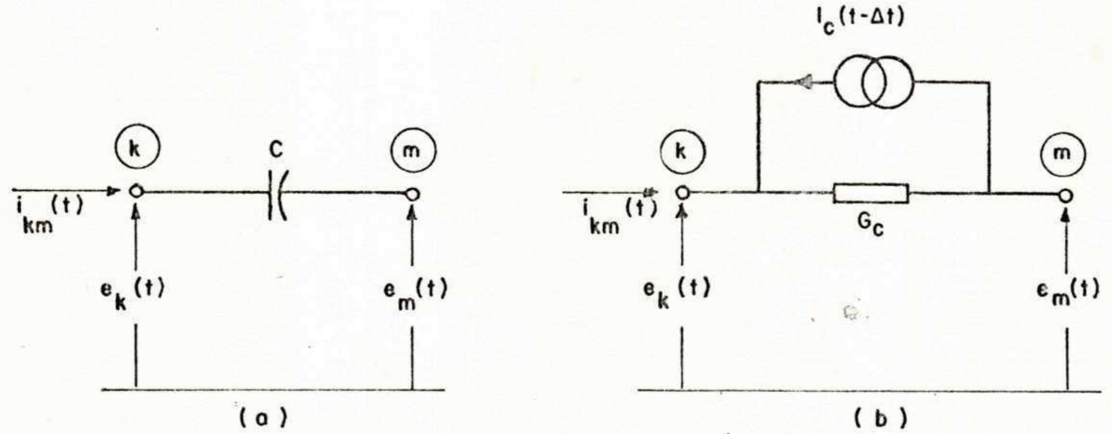


Fig. 3 - (a) Capacitância. (b) Circuito equivalente.

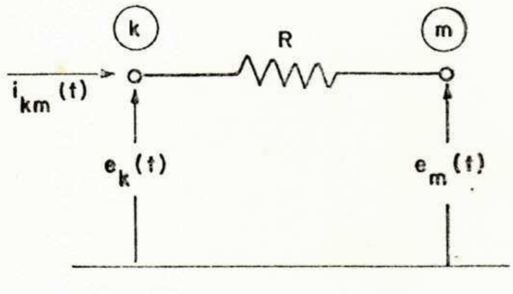


Fig. 4 - Resistência.

e,

$$I_c(t - \Delta t) = i_{km}(t - \Delta t) + G_c\ e_{km}(t - \Delta t)$$

trocando-se a viável $(t - \Delta t)$ por t, esta equação fica

$$I_c(t) = G_c\ e_{km}(t) + i_{km}(t) \tag{14}$$

donde eliminando-se $i_{km}(t)$ resulta

$$I_c(t) = 2G_c\ e_{km}(t) - I_c(t - \Delta t) \tag{15}$$

1.4 Resistência.

Para a resistência da fig. 4,

$$i_{km}(t) = G_R\ e_{km}(t)$$

onde

$$G_R = \frac{1}{R}$$

1.5 Equações Nodais.

Com todos os elementos do sistema substituídos por seus circuitos equivalentes, se podem estabelecer as equações nodais, que irão descrever o estado do sistema em qualquer tempo t:

$$[G]\ [e(t)] = [i(t)] - [I] \tag{16}$$

com,

$[G]$ = matriz condutância nodal,

$[e(t)]$ = vetor coluna das tensões nodais no tempo t;

$[i(t)]$ = vetor coluna das correntes injetadas no tempo t (fonte de correntes especificadas);

$[I]$ = vetor coluna de valores históricos.

A matriz condutância $[G]$ é real, simétrica e constante (uma vez que Δt é fixo).

A eq. (16), onde uma parte das tensões são conhecidas (excitações especificadas), pode ser reescrita do seguinte modo:

$$\begin{bmatrix} [G_{AA}] & [G_{AB}] \\ [G_{BA}] & [G_{BB}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [e_A(t)] \\ [e_B(t)] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [i_A(t)] \\ [i_B(t)] \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} [I_A] \\ [I_B] \end{bmatrix}$$

Sendo os subvetores $[e_A(t)]$ e $[e_B(t)]$ constituídos exclusiva e respectivamente das tensões desconhecidas e conhecidas. Os demais subvetores e as submatrizes são consequências da reordenação e da partição por que passaram a matriz e os vetores originais. É claro que $[e_A(t)]$ pode ser determinado resolvendo-se

$$\left[G_{AA}\right] \left[e_A(t)\right] = \left[I_{\text{total}}\right] \tag{17}$$

sendo

$$\left[I_{\text{total}}\right] = \left[i_A(t)\right] - \left[I_A\right] - \left[G_{AB}\right] \left[e_B(t)\right] \tag{18}$$

O problema de cálculo de transitórios eletromagnéticos se reduz assim, a resolução de um sistema de equações lineares com coeficientes constantes a cada intervalo de tempo Δt. Devendo $\left[I_{\text{total}}\right]$, ser recalculado a cada passo.

1.6 Considerações sobre as Perdas numa linha.

Numa linha real de potência, as perdas são praticamente devidas a resistência série distribuída. A condutância em derivação usualmente é desprezível, sempre que o efeito corona não é levado em conta.

Uma linha com extensão d, resistência série R' por unidade de comprimento, e condutância shunt nula, pode ser tratada como uma linha sem perdas, aos terminais da qual é adicionado resistências concentradas de valor

$$R = \frac{R'd}{2}$$

Este procedimento, apesar de simples, dá resultados satisfatórios. Tais resistências concentradas podem ser inseridas também em outros pontos da linha, quando ela é dividida em várias secções. Entretanto, nenhuma diferença substancial ocorre quando o número de resistências inseridas é menor ou maior. Esta é a conclusão de DOMMEL (1969), após calcular as sobretensões em uma linha, inserindo resistências em 3, 65 e 300 lugares. Nos três casos, os gráficos de tensão obtidos mostraram-se praticamente idênticos. / OBS F

2. Simulação de Chaveamentos.

É possível simular elementos tais como disjuntores e *gaps* presentes ao sistema, por chaves ideais (resistência nula quando fechada e infinita quando aberta). As propriedades físicas destes elementos podem ser levadas em conta, conectando-se ramos em série ou em paralelo com a chave. A mudança de posição destas chaves obedecem naturalmente a diferentes critérios. A abertura de um disjuntor, por exemplo, pode ocorrer segundo um critério de tempo ou de corrente. Já o fechamento da chave que simula a descarga em um *gap*, acontece de acordo com um critério de tensão. Isto é, a chave fecha quando a tensão no *gap* ultrapassa sua tensão de centelhamento. Portanto, um método para simulação do fechamento ou abertura de uma chave deve estar apto a considerar diferentes critérios. Dois destes métodos são apresentados a seguir. XF

XI

2.1 Método da Tensão de Cancelamento.

Se há somente uma chave no sistema, que seja entre os nós k e m, seu fechamento pode ser simulado (NAIDU, 1979) do seguinte modo:

a - Com a chave (k - m) aberta, determina-se para $t > 0$, as tensões em todos os nós, e entre os contactos da chave:

$$e_{km}^{0}(t) = e_{k}^{0}(t) - e_{m}^{0}(t)$$

b - Com todas as fontes removidas, aplica-se uma tensão $-e_{km}^{0}(t)$ entre os contatos da chave. Calcula-se as tensões e correntes transitórias devidas a esta excitação.

c - Superpondo-se as tensões calculadas nos ítens anteriores, se obtem as tensões transitórias após o fechamento da chave.

Este método é incoveniente para simular o fechamento sequencial de várias chaves. Como, por exemplo, um único disjuntor trifásico, se constitui de pelo menos seis chaves, o método é praticamente inviável.

2.2 Método da Modificação da Matriz Condutância.

Uma alternativa para o método da tensão de cancelamento é construir $[G_{AA}]$ novamente, sempre que alguma chave mude de posição. De fato, estas reconstruções são desnecessárias. Em vez disto $[G_{AA}]$ inicialmente formada com todas as chaves abertas, se modifica sistematicamente a medida que ocorram chaveamentos.

Se há uma chave entre os nós k e m de tensões desconhecidas, então estes nós figuram na matriz $[G_{AA}]$, enquanto a chave está aberta; quando ocorre o fechamento, eles tornam-se comum, e $[G_{AA}]$ modifica-se do seguinte modo:

a - as filas (linhas e colunas) m são adicionadas as filas k;

b - as filas m são suprimidas;

c - a ordem de $[G_{AA}]$ é reduzida de n para n - 1.

XF

3. Extensão do Método de Dommel a Sistemas Polifásicos.

A computação de transitórios eletromagnéticos em sistemas polifásicos pode ser feito como se faz para circuitos monofásicos, substituindo-se formalmente as quantidades escalares por quantidades matriciais. Esta generalização é imediata para indutância e capacitância concentradas, com acoplamento entre fases. Para linhas de transmissão polifásicas, as grandezas de fase acopladas são transformadas em *grandezas modais* desacopladas e cada modo é resolvido com as mesmas equações que foram desenvolvidas para linhas monofásicas. XF

A *teoria de transformação modal* é válida para sistemas com qualquer número de fases. A seguir, ela é aplicada a uma linha trifásica, por ser de interesse prático. XF

3.1 Elementos com Parâmetros Concentrados.

Considerando-se que o ramo trifásico mostrado na fig. 5, tem indutância $[L]$, então

$$\left[e_{km}(t)\right] = [L] \left[\frac{di_{km}(t)}{dt}\right] \tag{19}$$

onde,

$$\left[e_{km}(t)\right] = \begin{bmatrix} e^{a}_{km}(t) \\ e^{b}_{km}(t) \\ e^{c}_{km}(t) \end{bmatrix}$$

é o vetor das tensões em cada fase; e

$$\left[\frac{di_{km}\ t}{dt}\right] = \begin{bmatrix} \dfrac{di^{a}_{km}(t)}{dt} \\ \dfrac{di^{b}_{km}(t)}{dt} \\ \dfrac{di^{c}_{km}(t)}{dt} \end{bmatrix}$$

é vetor das derivadas das correntes em cada fase com relação ao tempo.

A matriz indutância tem a forma

$$[L] = \begin{bmatrix} L_s & L_m & L_m \\ L_m & L_s & L_m \\ L_m & L_m & L_s \end{bmatrix}$$

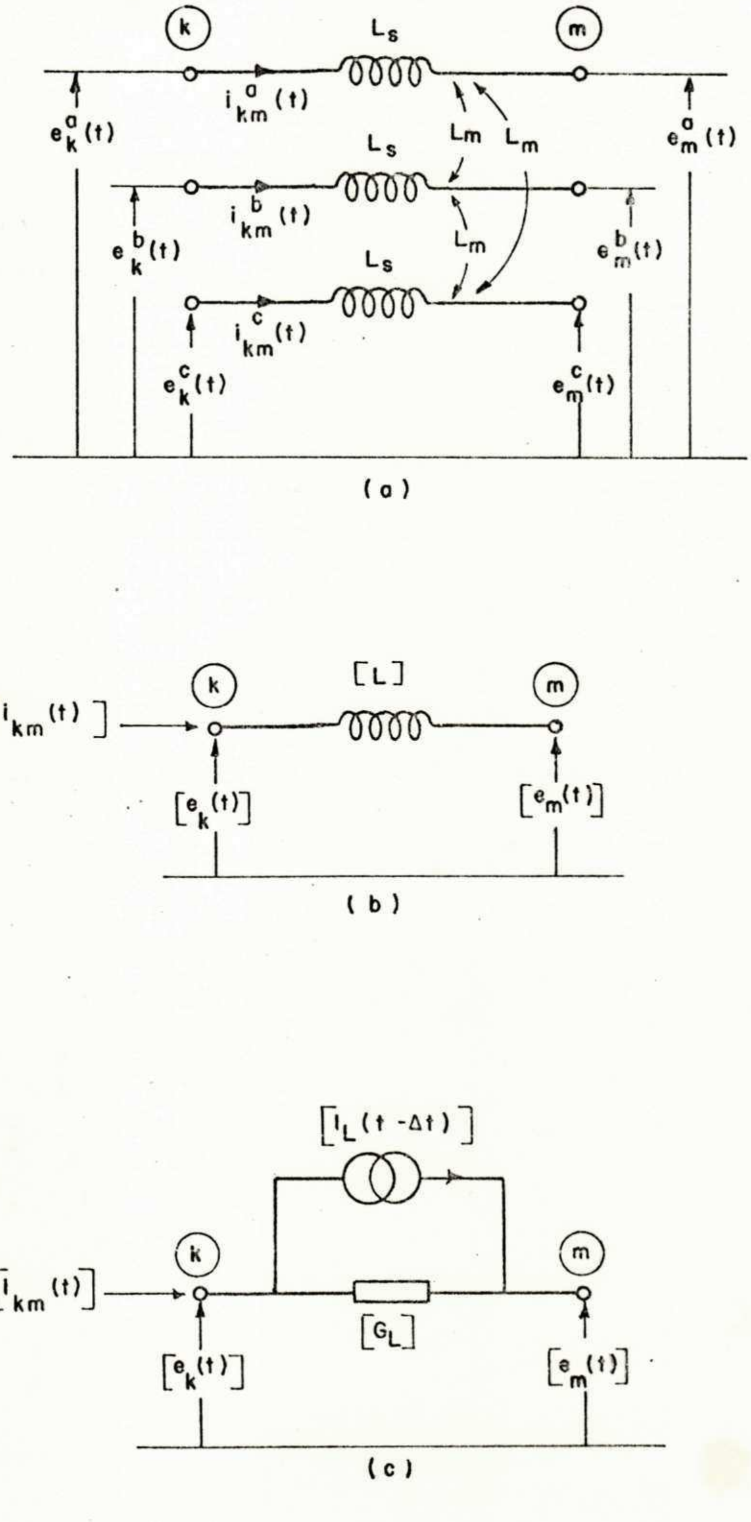


Fig. 5 - (a) Elemento trifásico; fases acopladas magnéticamente.

(b) Representação Simplificada. (b) Circuito equivalente.

L_s é a indutância própria e L_m a indutância mútua do elemento. Se $[L]$ não é diagonal ($L_m \neq 0$), há acoplamento entre as fases do elemento, isto é, a tensão em uma fase depende das tensões nas outras.

Utilizando a regra do trapézio para integrar (19) se obtém

$$\left[i_{km}(t)\right] = \left[G_L\right] \left[e_{km}(t)\right] + \left[I_L(t - \Delta t)\right]$$

sendo

$$\left[G_L\right] = \frac{\Delta t}{2} \left[L\right]^{-1} \qquad (20)$$

e

$$\left[I_L(t - \Delta t)\right] = \left[G_L\right] \left[e_{km}(t - \Delta t)\right] + \left[i_{km}(t - \Delta t)\right]$$

Trocando-se a variável $(t - \Delta t)$ por t se chega a

$$\left[I_L(t)\right] = \left[G_L\right] \left[e_{km}(t)\right] + \left[i_{km}(t)\right] \qquad (21)$$

logo

$$\left[I_L(t)\right] = 2 \left[G_L\right] \left[e_{km}(t)\right] + \left[I_L(t - \Delta t)\right] \qquad (22)$$

A semelhança entre as equações da secção 1.2 e as equações acima é evidente. A diferença é que nestas se tem matrizes correspondendo aos escalares que aparecem naquelas. Na construção das matrizes $[G_{AA}]$ e $[G_{AB}]$, eq. (17), uma matriz $[G_L]$ é introduzida em vez de um escalar. Também a cada passo, o vetor $[i_{km}(t)]$ entra na formação de $[I_{\text{total}}]$ em vez do escalar $i_{km}(t)$.

Raciocínio análogo a este, conduz a conclusão que todas as equações obtidas para elemento concentrado monofásico, continuam realmente válidas se o elemento for trifásico, se as variáveis são interpretadas como matrizes.

3.2 Linha Trifásica sem Perdas.

As equações (1) também são válidas para linhas polifásicas, desde que os escalares sejam substituídos por vetores $[e]$, $[i]$ e matrizes $[L]$, $[C]$. Assim, as equações correspondentes aquelas são:

$$-\frac{\partial}{\partial x}[e] = [L]\frac{\partial}{\partial t}[i] \tag{23a}$$

$$-\frac{\partial}{\partial x}[i] = [C]\frac{\partial}{\partial t}[e] \tag{23b}$$

donde,

$$\frac{\partial^2 [e]}{\partial x^2} = [L]\,[C]\,\frac{\partial^2 [e]}{\partial^2 t}$$

$$\frac{\partial^2 [i]}{\partial x^2} = [L]\,[C]\,\frac{\partial^2 [i]}{\partial t^2}$$

A solução destas equações é complicada devido a presença de elementos fora das diagonais das matrizes, consequentes do acoplamento entre as fases. Esta dificuldade é contornada, transformando-se as variáveis de fase em variáveis modais através de transformações que produzam matrizes diagonais nas equações modais. Cada uma das equações independentes no domínio modal podem ser resolvidas com o algoritmo desenvolvido para linha monofásica, usando-se o *tempo de trânsito modal* e a *impedância de surto modal*.

As matrizes de transformação, de modo geral são diferentes para tensão e corrente, isto é,

$$[E] = [S]\ [V] \tag{24a}$$

$$[I] = [Q]\ [J] \tag{24b}$$

onde

$[E]$ = Vetor tensão de fase,

$[I]$ = Vetor corrente de fase,

$[V]$ = Vetor tensão modal,

$[J]$ = Vetor corrente modal.

Se todos os elementos diagonais $[L]$ são iguais a L_s e os não diagonais são iguais a L_m (analogamente para C), então uma transformação única é possível:

$$[S] = [Q] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & (1-M) & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & 1 & (1-M) & \cdots & 1 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 1 & 1 & 1 & & (1-M) \end{bmatrix}$$

onde M é o número de fases. Sua inversa é simples:

$$[S]^{-1} = [Q]^{-1} = \frac{1}{M} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & -1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & -1 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 1 & 0 & 0 & & -1 \end{bmatrix}$$

Para circuitos trifásicos portanto,

$$[S] = [Q] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \tag{25a}$$

$$[S]^{-1} = [Q]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \tag{25b}$$

Com estas transformações, as equações diferenciais (23) tornam-se:

$$- \begin{bmatrix} \frac{\partial V_0}{\partial x} \\ \frac{\partial V_1}{\partial x} \\ \frac{\partial V_2}{\partial x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s + 2L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_s - L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_s - L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial J_0}{\partial t} \\ \frac{\partial J_1}{\partial t} \\ \frac{\partial J_2}{\partial t} \end{bmatrix} \qquad (26a)$$

$$- \begin{bmatrix} \frac{\partial J_0}{\partial x} \\ \frac{\partial J_1}{\partial x} \\ \frac{\partial J_2}{\partial x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_s + 2C_m & 0 & 0 \\ 0 & C_s - C_m & 0 \\ 0 & 0 & C_s - C_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial V_0}{\partial t} \\ \frac{\partial V_1}{\partial t} \\ \frac{\partial V_1}{\partial t} \end{bmatrix} \qquad (26b)$$

Para linha trifásica balanceada, os parâmetros de modos zero, um e dois são idênticos, aos parâmetros de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente.

Das equações (26), graças à diagonalidade das matrizes $[L]$ e $[C]$, se pode tirar três pares de equações, cada qual envolvendo apenas variáveis do mesmo modo, isto é,

$$- \frac{\partial V_0}{\partial x} = (L_s + 2L_m) \frac{\partial J_0}{\partial t}$$

$$- \frac{dJ_0}{dx} = (C_s + 2C_m) \frac{dV_0}{dt}$$

$$- \frac{dV_1}{dx} = (L_s - L_m) \frac{dJ_1}{dt}$$

$$- \frac{dJ_1}{dx} = (C_s - C_m) \frac{dV_1}{dt}$$

$$- \frac{dV_2}{dx} = (L_s - L_m) \frac{dJ_2}{dt}$$

$$- \frac{dJ_2}{dx} = (C_s - C_m) \frac{dV_2}{dt}$$

que são análogas a (1). Portanto a linha trifásica pode ser tratada como três linhas monofásicas independentes. Deste modo, conforme as equações (7),

$$j^0_{km}(t) = \frac{1}{Z_0} v^0_k(t) - J^0_k(t - \tau_0) \tag{27a}$$

$$j^1_{km}(t) = \frac{1}{Z_1} v^1_k(t) - J^1_k(t - \tau_0) \tag{27b}$$

$$j^2_{km}(t) = \frac{1}{Z_2} v^2_k(t) - J^2_k(t - \tau_2) \tag{27c}$$

$$j^0_{mk}(t) = \frac{1}{Z_0} v^0_m(t) - J^0_m(t - \tau_0) \tag{28a}$$

$$j^1_{mk}(t) = \frac{1}{Z_1} v^1_m(t) - J^1_m(t - \tau_1) \tag{28b}$$

$$j^2_{mk}(t) = \frac{1}{Z_2} v^2_m(t) - J^2_m(t - \tau_2) \tag{28c}$$

onde, de acordo com a equação (3)

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_s + 2L_m}{C_s + 2C_m}} \tag{29a}$$

$$Z_1 = Z_2 = \sqrt{\frac{L_s - L_m}{C_s - C_m}} \tag{29b}$$

são as impedâncias de surto modais da linha.

$$\tau_0 = d\,\sqrt{(L_s + 2L_m)(C_s + 2C_m)} \tag{30a}$$

$$\tau_1 = \tau_2 = d\,\sqrt{(L_s - L_m)(C_s - C_m)} \tag{30b}$$

são os tempos de trânsito modais.

Em forma matriciais (27) e (28) são:

$$\begin{bmatrix} j^0_{km}(t) \\ j^1_{km}(t) \\ j^2_{km}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v^0_k(t) \\ v^1_k(t) \\ v^2_k(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J^0_k(t - \tau_0) \\ J^1_k(t - \tau_1) \\ J^2_k(t - \tau_2) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} j^0_{mk}(t) \\ j^1_{mk}(t) \\ j^2_{mk}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v^0_m(t) \\ v^1_m(t) \\ v^2_m(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} J^0_m(t - \tau_0) \\ J^1_m(t - \tau_1) \\ J^2_m(t - \tau_2) \end{bmatrix}$$

isto é

$$\left[j_{km}(t)\right] = \left[Z\right]^{-1} \left[v_k(t)\right] - \left[J_k\; t - \tau\right] \tag{31a}$$

$$\left[j_{mk}(t)\right] = \left[Z\right]^{-1} \left[V_m(t)\right] - \left[J_m(t - \tau)\right] \tag{31b}$$

Retornando-se ao domínio da fase, através das transformações expressas pela equação (24), se chega a

$$\left[i_{km}(t)\right] = \left[Z_f\right]^{-1} \left[e_k(t)\right] - \left[I_k(t - \tau)\right] \tag{32a}$$

$$\left[i_{mk}(t)\right] = \left[Z_f\right]^{-1} \left[e_m(t)\right] - \left[I_m(t - \tau)\right] \tag{32b}$$

onde

$$\left[Z_f\right]^{-1} = \left[S\right] \left[Z\right]^{-1} \left[S\right]^{-1} \tag{33}$$

é a matriz admitância de surto equivalente da linha, e

$$\left[I_k(t - \tau)\right] = \left[S\right]\left[J_k(t - \tau)\right]$$

$$\left[I_m(t - \tau)\right] = \left[S\right]\left[J_m(t - \tau)\right]$$

As equações (7) e (32) são similares. As demais equações da linha monofásica se adaptam também a linha trifásica, desde que os escalares sejam substituídos por matrizes. Assim,

$$\left[I_k(t)\right] = \left[Z_f\right]^{-1} \left[e_m(t)\right] + \left[i_{mk}(t)\right] \tag{34a}$$

$$\left[I_m(t)\right] = \left[Z_f\right]^{-1} \left[e_k(t)\right] + \left[i_{km}(t)\right] \tag{34b}$$

$$\left[I_k(t)\right] = 2\left[Z_f\right]^{-1}\left[e_m(t)\right] - \left[I_m(t-\tau)\right] \tag{35a}$$

$$\left[I_m(t)\right] = 2\left[Z_f\right]^{-1}\left[e_k(t)\right] - \left[I_k(t-\tau)\right] \tag{35b}$$

XF

Xi

4. Energização de uma linha Trifásica.

Como uma primeira aplicação do método de Dommel, considere-se a energização da linha de transmissão *Jaguara-Taquaril*. Os resultados desta operação foram reproduzidos através de computador digital por CUNHA & DOMMEL (1973), utilizando um programa desenvolvido pela BPA (Bonneville Power Administration).

Com esta revisão se pretende, primeiro, compreender melhor como efetivamente funciona o método de Dommel. Segundo, desenvolver algumas subrotinas que possam ser empregadas em estudos posteriores.

4.1 Características da Linha e Circunstâncias da Energização.

Jaguara-Taquaril é uma linha transporta de 345 KV, com 398 km de extensão e constituída de condutores geminados (2 x 954 MCM-ACSR). Seus parâmetros nas frequências de 60 Hz, apresentados na tab. 1, foram calculados, supondo-se uma resistividade média do solo de 100 Ω.m.

A reatância de sequência negativa dos geradores e transformadores elevadores em Jaguara, é suposta igual a de sequência

PARÂMETRO	UNIDADE	SEQUÊNCIA POSITIVA		SEQUÊNCIA ZERO	
		NOTAÇÃO	VALOR	NOTAÇÃO	VALOR
Resistência	Ω / km	R_1	0,03419	R_0	0,32183
Reatância	Ω / km	X_1	0,37478	X_0	1,26693
Capacitância	μF / km	C_1	0,01180	C_0	0,00800

Tab. 1 Parâmetros da Linha Jaguara-Taquaril (DOMMEL & CUNHA, 1973).

FASE	CONTATO	
	AUXILIAR	PRINCIPAL
A	8.45	15.85
B	7.15	14.45
C	8.10	15.10

Tab. 2 Energização da Linha Jaguara-Taquaril. Tempos de fechamento em ms, dos contatos do disjuntor (DOMMEL & CUNHA, 1973).

positiva (X_1), calculada em 99,6 ohm, a 60 Hz. A reatância de sequência zero (X_0) dos transformadores a 60 Hz, é de 33,76 ohm. As reatâncias própria (X_s) e mútua (X_m) equivalentes a estes valores são respectivamente, 77,65 ohm e 21,95 ohm. Uma vez que

$$X_s = \frac{1}{3} (X_0 + 2X_1) \tag{36a}$$

$$X_m = \frac{1}{3} (X_0 - X_1) \tag{36b}$$

A linha está em vazio (fig. 6) e imediatamente antes da energização, a tensão é 328 KV, ou seja, 0,95 p.u. Esta é a tensão atrás da reatância subtransitória. Tomando como tempo inicial, aquele em que a tensão na fase a passa por zero, indo para valores nagativos, a fonte tem f.e.m. dada por:

$$e_a = 0{,}95 \text{ Cos } (\omega t + \pi/2) \text{ p.u.} \tag{37a}$$

$$e_b = 0{,}95 \text{ Cos } (\omega t - \pi/6) \text{ p.u.} \tag{37b}$$

$$e_c = 0{,}95 \text{ Cos } (\omega t + 7\pi/6) \text{ p.u.} \tag{37c}$$

De acordo com este mesmo referencial de tempo, os instantes dos fechamentos dos contatos do disjuntor são aqueles da tab. 2. Este disjuntor tem resistores de preinserção de 400 ohm por polo.

O reator trifásico de 440 KV, 91 MVAr, 60 Hz instalado em Jaguara tem reatância de sequência positiva

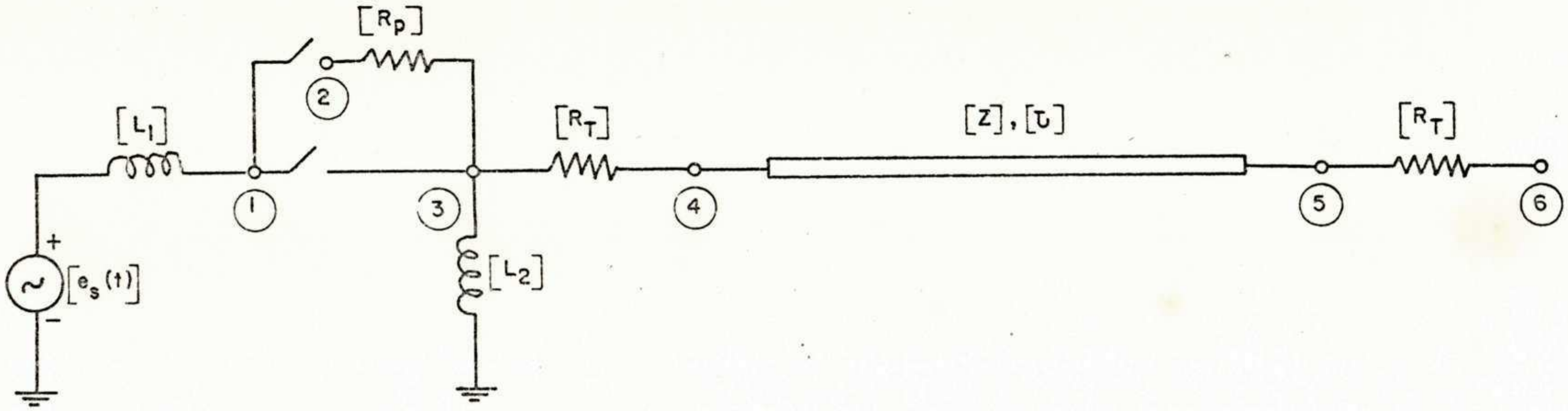


Fig. 6 - Sistema Jaguara-Taquaril.

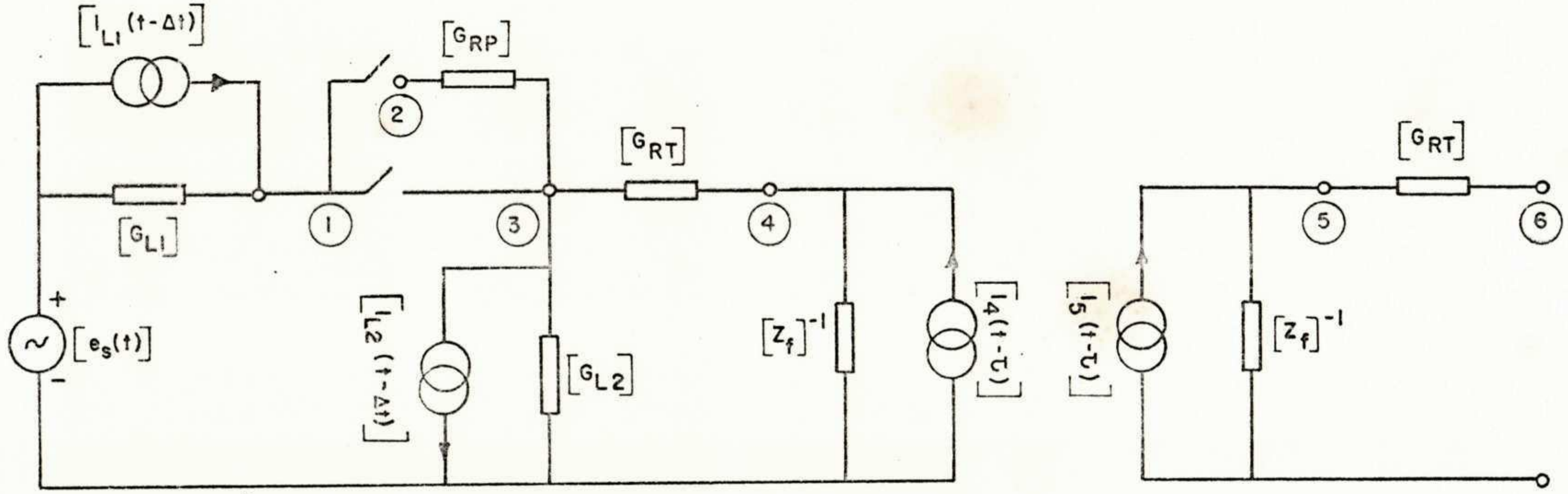


Fig. 7 - Circuito Equivalente ao Sistema Jaguara-Taquaril.

$$X_1 = \frac{(440 \,.\, 10^3)^2}{91 \,.\, 10^6} = 2127\ \Omega$$

Supondo a reatância de sequência zero igual a 35% deste valor, isto é, $X_0 = 744\ \Omega$, a reatância própria desse reator é 1666 Ω e a reatância mútua -461 Ω (conforme as equações (36)).

4.2 Circuito Equivalente e suas Equações.

Na fig. 7 é visto o circuito equivalente ao sistema em questão (fig. 6). As equações nodais deste circuito são imediatas, pelo menos para os nós 1, 2 e 3:

$$\left[G_{L1}\right] \left[e_1(t)\right] = \left[I_{L1}(t - \Delta t)\right] + \left[G_{L1}\right] \left[e_s(t)\right] \tag{38a}$$

$$\left[G_{RP}\right] \left[e_2(t)\right] - \left[G_{RP}\right] \left[e_3(t)\right] = \left[0\right] \tag{38b}$$

$$\begin{aligned} -\left[G_{RP}\right] \left[e_2(t)\right] + \left(\left[G_{RP}\right] + \left[G_{L2}\right] + \left[G_{RT}\right]\right) \left[e_3(t)\right] - \\ -\left[G_{RT}\right] \left[e_4(t)\right] = -\left[I_{L2}(t - \Delta t)\right] \end{aligned} \tag{38c}$$

A tensão dos nós 5 e 6 são sempre iguais, uma vez que entre eles há apenas um elemento concentrado e a linha está em vazio. Assim, o nó 6 pode ser excluído da análise.

Nos nós 4 e 5 se tem respectivamente que

$$-\left[G_{RT}\right] \left[e_3(t)\right] + \left[G_{RT}\right] \left[e_4(t)\right] + \left[i_{45}(t)\right] = \left[0\right]$$

$$\left[i_{54}(t)\right] = \left[0\right]$$

Conforme as equações (32),

$$\left[i_{45}(t)\right] = \left[Z_f\right]^{-1} \left[e_4(t)\right] - \left[I_4(t - \tau)\right]$$

$$\left[i_{54}(t)\right] = \left[Z_f\right]^{-1} \left[e_5(t)\right] - \left[I_5(t - \tau)\right]$$

logo,

$$-\left[G_{RT}\right] \left[e_3(t)\right] + \left(\left[G_{RT}\right] + \left[Z_f\right]^{-1}\right) \left[e_4(t)\right] = \left[I_4(t - \tau)\right] \tag{38d}$$

e

$$\left[Z_f\right]^{-1} \left[e_s(t)\right] = \left[I_5(t - \tau)\right]$$

Evidentemente, em todas as equações acima $[Z_f]^{-1}$ e as condutâncias ($[G]$) são matrizes de ordem 3x3; as tensões e correntes são vetores de ordem 3.

Estruturando matricialmente as equações (38) se chega a equação (39), que é a versão trifásica da equação (17), correspondente ao sistema em estudo.

$$[G_{AA}] = \begin{bmatrix} [G_{L1}] & [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [G_{RP}] & -[G_{RP}] & [0] & [0] \\ [0] & -[G_{RP}] & [G_{RP}]+[G_{L2}]+[G_{RT}] & -[G_{RT}] & [0] \\ [0] & [0] & -[G_{RT}] & [G_{RT}]+[Z_f]^{-1} & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & [Z_f]^{-1} \end{bmatrix} \tag{39}$$

$$[I_{\text{total}}] = \begin{bmatrix} [I_{L1}(t - \Delta t)] + [G_{L1}]\ [e_s(t)] \\ [0] \\ -[I_{L2}(t - \Delta t)] \\ [I_4(t - \tau)] \\ [I_5(t - \tau)] \end{bmatrix} \qquad (40)$$

Todos os parâmetros do circuito equivalente a Jaguara--Taquaril (fig. 7), excluindo-se naturalmente as matrizes correspondentes às perdas $[G_{AT}]$ e às resistências de preinserção $[G_{RP}]$ dependem do intervalo base de tempo Δt; escolhendo-o igual a 0,34 ms, estes parâmetros assumem os valores apresentados na tab. 3. Nesta mesma tabela estão inclusos, os valores da impedância de surto e tempos de trânsito modais.

De posse dos valores das matrizes elementares, se tem o da matriz condutância do sistema $[G_{AA}]$.

4.3 Cálculo das Tensões nos extremos da Linha.

Até que ocorra o fechamento do primeiro contacto do disjuntor, não haverá nenhuma corrente no circuito e as tensões nodais serão todas nulas, exceto $[e_1(t)]$ que será igual a $[e_s(t)]$ (especificada pelas equações (37)). Assim, os valores iniciais de todas as fontes de correntes são zero.

Após o primeiro fechamento, do contacto ($1b$-$2b$), as tensões $e_2^b(t)$, $e_3^b(t)$ e $e_4^b(t)$ não são mais zero, nem $e_1^b(t)$ é igual a $e_s^b(t)$. Mesmo assim, $[e_5(t)]$ permanece nula, já que a onda de tensão leva algum tempo para chegar ao nó 5. Do mesmo modo $[I_5(t-\tau)]$

PARÂMETRO	UNID.	VALOR			
		PRÓPRIO	MÚTUO	DE MODO ZERO	DE MODO UM
$[G_{L1}]$	mho	$1{,}061\mathrm{x}10^{-3}$	$0{,}418\mathrm{x}10^{-3}$		
$[G_{L2}]$	mho	$4{,}880\mathrm{x}10^{-5}$	$1{,}867\mathrm{x}10^{-5}$		
$[G_{RP}]$	mho	$2{,}5\ \mathrm{x}10^{-3}$	0		
$[G_{RT}]$	mho	0,1032	0,0438		
$[Z_f]^{-1}$	mho	$2{,}813\mathrm{x}10^{-3}$	$-0{,}635\mathrm{x}10^{-3}$		
$[Z]$	ohm			648	290
τ	-			6	4

Tab. 3 Valores dos parâmetros do circuito equivalente a Jaguara-Taquaril (fig. 7). Δt = 0,34 ms.

continua igual a zero. A corrente $[i_{54}(t)]$ é sempre zero.

A verificação de particularidades como estas, durante os cálculos, ajuda a garantir que os mesmos se desenvolvem satisfatoriamente.

O valor das fontes de correntes que entram na formação de $[I_{total}]$ são calculados através das fórmulas recursivas (22) e (33), isto é, especificamente,

$$\left[I_{L1}(t)\right] = 2\left[G_{L1}\right]\left(\left[e_s(t)\right] - \left[e_1(t)\right]\right) + \left[I_{L1}(t - \Delta t)\right] \tag{41a}$$

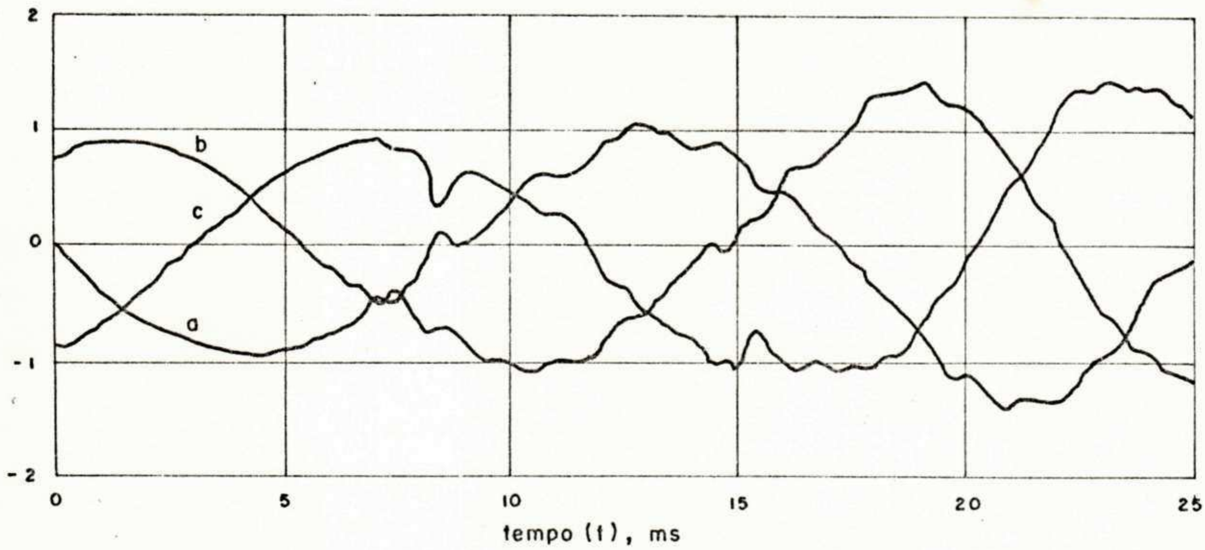
$$\left[I_{L2}(t)\right] = 2\left[G_{L2}\right]\left[e_1(t)\right] - \left[I_{L2}(t - \Delta t)\right] \tag{41b}$$

$$\left[I_4(t)\right] = 2\left[Z_f\right]^{-1}\left[e_5(t)\right] - \left[I_5(t - \tau)\right] \tag{41c}$$

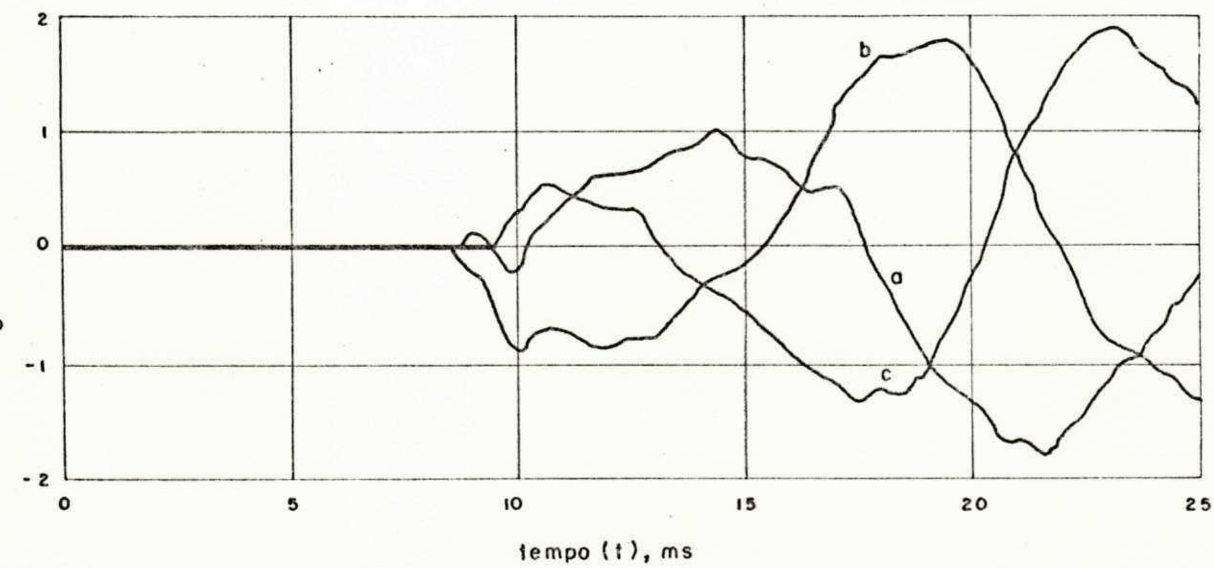
$$\left[I_5(t)\right] = 2\left[Z_f\right]^{-1}\left[e_4(t)\right] - \left[I_4(t - \tau)\right] \tag{41d}$$

Depois de formado $[I_{total}]$, a equação (17) é resolvida, para que as tensões sejam determinadas. Antes, porém, se acontece mudança de posição de alguma chave, $[G_{AA}]$ e $[I_{total}]$ são modificadas conforme algoritmo da secção 2.2 . Após a determinação das tensões nodais, os valores históricos são atualizados. Passa-se, então, ao próximo intervalo de tempo, repetindo-se o procedimento adotado no passo anterior.

A fig. 8 mostra as tensões em Jaguara, $[e_4(t)]$ e em Taquaril, $[e_5(t)]$, em função do tempo. Este resultado é idêntico ao apresentado por CUNHA & DOMMEL (1973), apesar de não se haver considerado aqui, a saturação do núcleo do reator.



(a)



(b)

Fig. 8 - Energização da Linha Jaguara-Taquaril. (a) Tensão em Jaguara; (b) Tensão em Taquaril. Base: $345\sqrt{2}\ /\ \sqrt{3}$ kV.

CAPÍTULO III

ASPECTOS PRÁTICOS DO MÉTODO DE DOMMEL

1. Esparsidade da Matriz Condutância.

A matriz condutância de qualquer sistema trifásico é bastante esparsa. $[G_{AA}]$ de Jaguara-Taquaril, eq. (II-39), por exemplo, tem mais de 77% dos elementos, nulos. Ainda que esta esparsidade não seja explorada como sugere TINNEY & WALKER (1967), alguma providência deve ser tomada, no sentido de reduzir o esforço computacional desprendido no cálculo dos Transitórios.

Ao eliminarem-se nós do circuito, a esparsidade, além da própria dimensão de $[G_{AA}]$ diminuem. Isto pode ser enfatizado considerando-se o sistema da fig. 2. Levando em conta todos os nós daquele sistema, sua matriz condutância tem cerca de 85% dos elementos, nulos. Este índice cai para próximo de 75%, ao eliminarem-se os nós 5, 6, 7 e 8. Enquanto isto, a dimensão da referida matriz diminui para a metade da dimensão inicial.

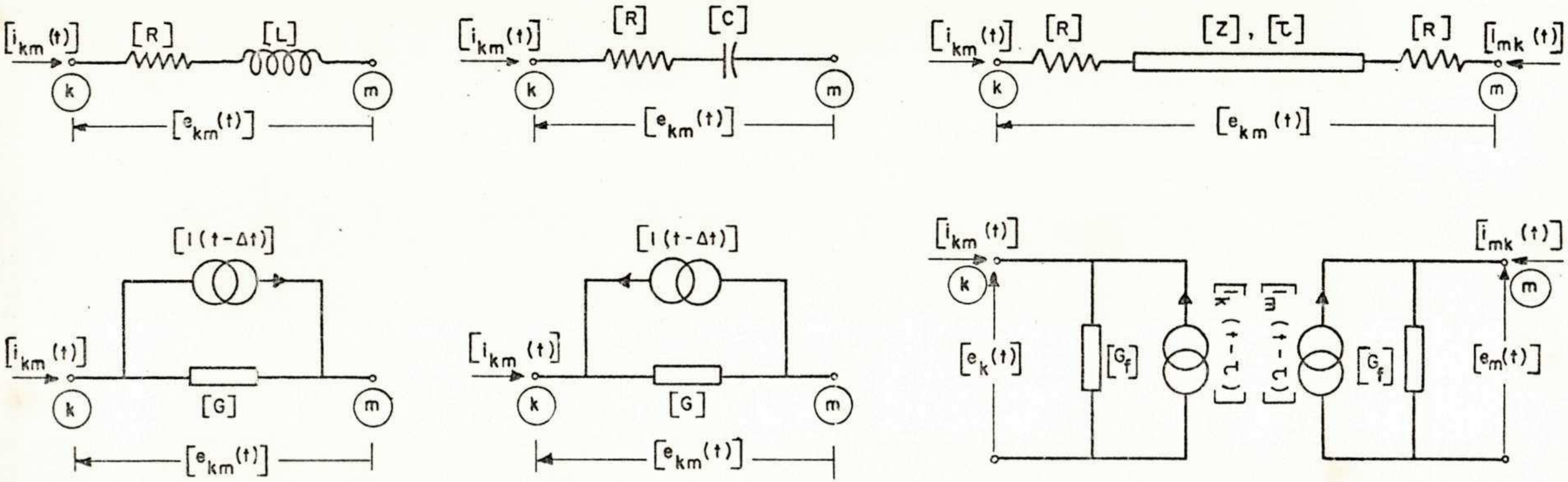
2. Redução do Número de Nós.

Numa associação RL série que representa um reator (R significando as perdas), por exemplo, o nó entre o resistor e o indutor é artificial. Nunca há interesse em se conhecer a tensão nesse nó. Sua eliminação é portanto possível, e conveniente, uma vez que torna $[G_{AA}]$ menor e mais compacta. Eliminar um nó consiste simplesmente em ignorá-lo e obter relações diretas entre as tensões e correntes dos nós vizinhos a eles.

A tab. 1 apresenta os circuitos equivalentes a indutância, capacitância e linha trifásicas com resistência série. As equações que lá aparecem são consequências de simples manipulações algébricas daquelas deduzidas no capítulo anterior. Com respeito às equações da linha, as matrizes com índice f são parâmetros equivalentes no domínio da fase. $[U]$ é a matriz identidade. $[S]$ e $[S]^{-1}$ correspondem às transformações modais, definidas pelas equações (II-25). As demais matrizes são parâmetros modais.

$$[R] = \frac{d}{2}\,[R']$$

onde d é o comprimento da linha e $[R']$ a matriz de resistência modal (que é igual a de sequência), em Ω/km. $[G]$ é a matriz condutância modal. $[H]$ e $[G']$ são *fatores de ajustamento do efeito resistivo*. As equações da secção II-2 podem ser entendidas como as da tab. 1 particularizadas para $[R] = [0]$.



$$[G] = \left([R] + \frac{2}{\Delta t}[L]\right)^{-1}$$

$$[H] = [G]\left(\frac{2}{\Delta t}[L] - [R]\right)$$

$$[I(t-\Delta t)] = [G][e_{km}(t-\Delta t)] + [H][i_{km}(t-\Delta t)]$$

$$[I(t)] = [G]([H]+[U]) \cdot [e_{km}(t)] + [H][I(t-\Delta t)]$$

$$[G] = \left([R] + \frac{\Delta t}{2}[C]^{-1}\right)^{-1}$$

$$[H] = [G]\left(\frac{\Delta t}{2}[C]^{-1} - [R]\right)$$

$$[I(t-\Delta t)] = [G][e_{km}(t-\Delta t)] + [H][i_{km}(t-\Delta t)]$$

$$[I(t)] = [G]([H]+[U]) \cdot [e_{km}(t)] - [H][I(t-\Delta t)]$$

$$[G] = ([Z] + [R])^{-1} \qquad [G_f] = [S][G][S]^{-1}$$

$$[H] = [G]([Z] - [R]) \qquad [H_f] = [S][H][S]^{-1}$$

$$[G'] = [G]([U] + [H]) \qquad [G'_f] = [S][G'][S]^{-1}$$

$$[I_k(t-\tau)] = [G_f][e_m(t-\tau)] + [H_f][i_{mk}(t-\tau)]$$

$$[I_m(t-\tau)] = [G_f][e_k(t-\tau)] + [H_f][i_{km}(t-\tau)]$$

$$[J_k(t)] = [G'][V_m(t)] - [H][J_m(t-\tau)]$$

$$[J_m(t)] = [G'][V_k(t)] - [H][J_k(t-\tau)]$$

Tab. 1 - Circuitos equivalentes a indutância, capacitância e linha trifásicas em série com resistências.

3. O Processo Computacional

A versão final do programa TRANAL, com o qual foram resolvidos os problemas de que trata este texto, é vista no apêndice. Nesta secção são feitas algumas considerações sobre ele.

TRANAL está em linguagem WATFIV-S, que apesar de mais lenta que o FORTRAN IV padronizado, dispõe de vários recursos que favoreceram a programação estruturada. Estes recursos foram aproveitados de modo que o programa pode ser adaptado com facilidade a outros estudos de transitórios. TRANAL pode simultâneamente, fazer vários estudos. Dependendo do estudo o tempo de processamento foi da ordem de 60 a 850 segundos. Algumas de suas subrotinas são auxiliares e servem para relatar resultados ou fazer advertências.

3.1 Valores Instantâneos das excitações do Sistema.

O sistema pode ser excitado por tensão, por corrente, ou por uma combinação de ambas. No programa TRANAL, estas fontes de tensão ou corrente são senoidais. Seus valores em cada instante são computados pela subrotina REGIME. Não haveria nenhuma dificuldade em se calcular estes valores instantâneos, se as excitações fossem ondas retangulares, triangulares, etc. Nos casos em que as excitações não possam se expressar facilmente através de uma função matemática, então os valores instantâneos devem ser lidos, passo a passo em um arquivo de entrada (cartões perfurados, fita magnética, etc).

X

3.2 Construção do Vetor $[I_{total}]$ e cálculo das Tensões Nodais.

Uma vez calculados, os valores das excitações ($[i_B(t)]$ e $[e_B(t)]$ são introduzidos no vetor $[I_{total}]$, de acordo com a eq. (II-18), a exemplo do que acontece com as informações históricas ($-[I_A]$). No programa TRANAL, a formação de $[I_{total}]$ é da competência do bloco CORIG.

A resolução da eq. (II-17) é análoga ao problema do fluxo de carga em regime permanente. Estes problemas diferem apenas quanto à natureza dos passos: enquanto no fluxo de carga há passos de iteração, se tem no cálculo de transitórios passos de tempo.

A melhor maneira de se resolver a eq. (II-17) é inicialmente se triangularizar a matriz $[G_{AA}]$ de uma vez por todas, até que ela sofra modificação, devido algum chaveamento. Em cada passo, a triangulação é extendida ao vetor $[I_{total}]$ e com a substituição regressiva (*backsubstition*) se obtem $[e_A(t)]$. No programa TRANAL, o cálculo das tensões nodais fica a cargo de LUSOLV. Na saída desta subrotina, no espaço de memória antes ocupado por $[I_{total}]$ está armazenado $[e_A(t)]$. LUSOLV possui uma entrada auxiliar (ENTRY FWBWC), pela qual as repetições desnecessárias do pivotamento e da triangulação são evitadas. XF.

3.3 Determinação das Condições Iniciais.

Pela natureza recursiva do método, há necessidade de se conhecer o estado do sistema antes do tempo inicial; ou mais pre cisamente: os valores das fontes de correntes dos circuitos equivalentes devem ser determinados antes mesmo de começar o cálculo dos transitórios eletromagnéticos. Na energização de Jaguara-Taquaril, estes valores são todos nulos. Noutros casos, estas informações, que constituem as *Condições Iniciais* do problema, não são conseguidas com tamanha facilidade. Entre estes casos está a desenergização de um reator shunt de alta tensão; problema capital neste trabalho e que começará a ser abordado ainda neste capítulo.

No programa TRANAL, as condições iniciais são obtidas a partir da análise do sistema em regime permanente senoidal, feita pela subrotina START, que recorre aos subprogramas FECHY, GAUSC e POLAR.

Uma alternativa para a determinação das condições iniciais é se retroceder a um passado remoto e então partir daí sob condições iniciais zero. Este recuo deve ser suficiente para que a componente transitória tenha sido amortecida (cerca de dez ciclos de onda em 60 Hz) e se tenha apenas a onda senoidal perto do tempo atual (t_0 na fig. 1).

Esta alternativa foi explorada num programa antecessor do TRANAL. Nela foi utilizada memória dinâmica, na qual somente os valores históricos foram armazenados. Isto é, os valores passados que não mais importassem ao processo computacional eram destruídos e o espaço da memória reutilizado por novos valores históricos. Esta providência diminuiu a quantidade de memória requerida, mas em contrapartida, aumentou ainda mais o tempo de processamento. Para reduzi-lo, se utilizou um segundo intervalo base durante o período de recuo, dez vezes maior que aquele utili-

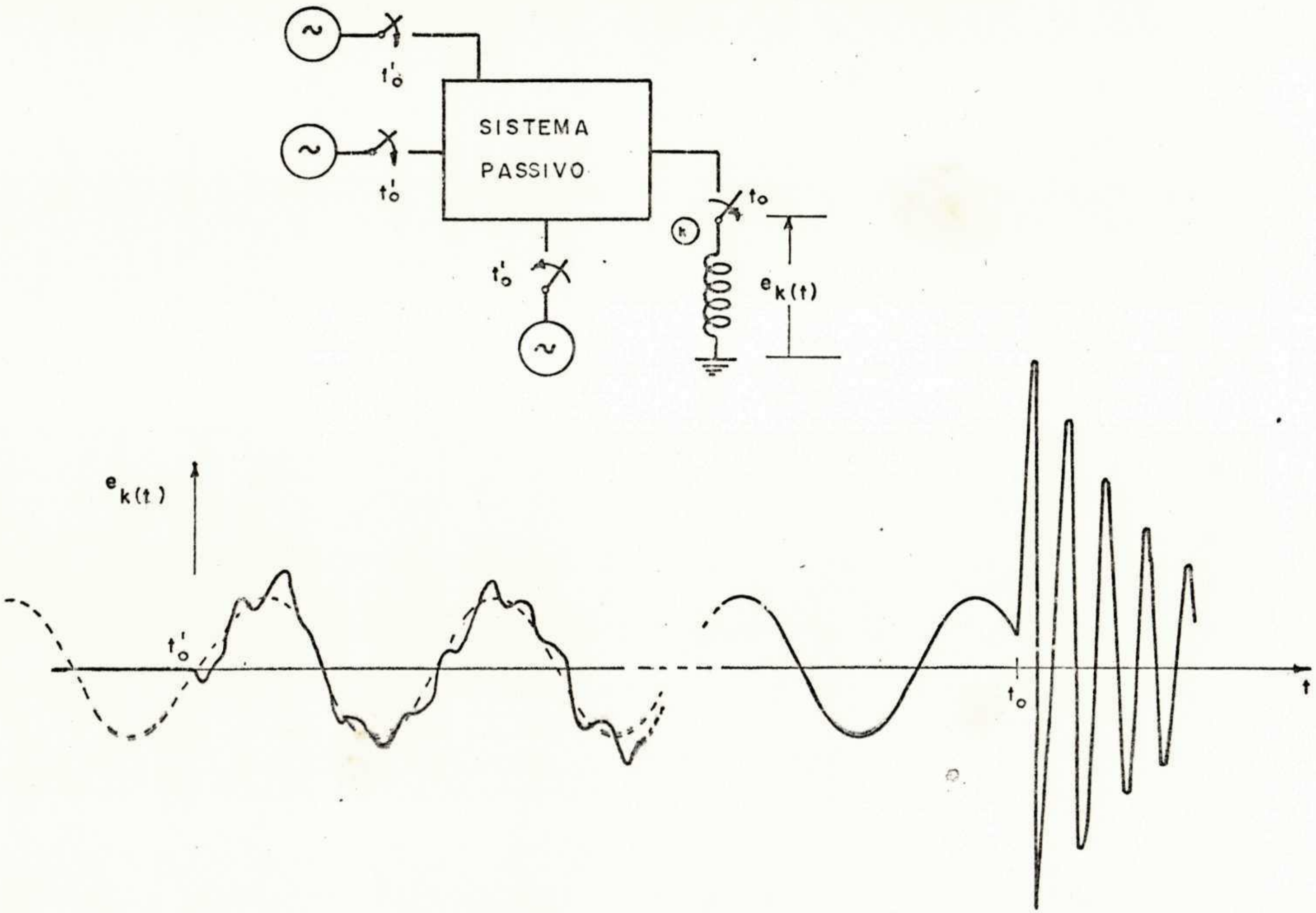


Fig. 1 - Ilustrações da obtenção das condições iniciais retrocedentes no tempo.

zado a partir do tempo inicial t_0. Com dois intervalos base é necessária uma interpolação nas proximidades de t_0.

Todo este empreendimento, complica o processo computacional a ponto de tornar este método um substitutivo, e não uma alternativa, para a análise em regime permanente. Isto é, quando antes de transitório o sistema está em regime permanente não senoidal, por questão de não linearidade, por exemplo, este método é indicado.

3.4 Chaveamento.

O programa TRANAL simula chaveamentos através de FECHE: subrotina desenvolvida segundo o algoritmo da secção II-2.2. Originalmente, com todas as chaves abertas é construída a matriz condutância do sistema. Se o estudo cobre apenas fechamentos, as alterações são feitas nesta própria matriz. Entretanto, se ocorre abertura, a simulação é indireta: da matriz original é feita uma cópia (bloco COPIA em TRANAL) que se modifica para acomodar fechamentos que equivalem à abertura. Por exemplo, na fig. 2, a fase *b* do disjuntor é a primeira a sofrer preinserção de resistência. Este evento é visto pelo programa como o fechamento de todas as chaves, exceto da chave (2*b*-3*b*).

A subrotina FECHE possui duas entradas auxiliares, ENTRY FECHX, pela qual são feitas modificações apenas no Vetor $[I_{total}]$ e que é utilizada juntamente com ENTRY FWBWC; ENTRY ABREX, sempre utilizada após as tensões nodais haverem sido calculadas, para atribuir valores as tensões dos nós eliminados por chaveamen tos. Como em LUSOLV, a entrada principal de FECHE só é usada no passo incial e naqueles em que há chaveamentos. A subrotina FECHY a que recorre START é a própria FECHE, adaptada para operar com matrizes complexas. XF

XI

4. Precisão e Estabilidade Numérica.

Para se chegar a eq. (II-17) foram feitas aproximações para indutâncias e capacitâncias. Linhas sem perdas e resistências foram tratadas rigorosamente. Muito embora na prática, se cometa algum erro, sempre que o tempo de trânsito na linha não é um múltiplo de Δt.

Matematicamente, o método é uma integração passo a passo das equações diferenciais de L e C, usando a regra do trapézio, tendo erro de truncamento da ordem de Δt^3. Teoricamente, se pode chegar tão próximo da integral exata quanto se queira, tomando-se Δt suficientemente pequeno. Na prática, entretanto o erro de arredondamento e o tempo de computação limita esta proximidade. Contudo, é possível escolher o valor de Δt que permita se ter uma curva bastante nítida (pontos não afastados demasiadamente) das oscilações de alta frequência, resultados com boa precisão e tempo de processamento normal. Segundo DOMMEL (1969), mudança de Δt, influencia principalmente a fase das oscilações de alta frequência. A amplitude permanece praticamente invariável.

A regra do trapézio usada para indutância e capacitância concentradas é adequada para propósitos práticos, especialmente se há poucos destes elementos no circuito. Procedimentos de integração são numericamente estáveis e apresentam erros de arredondamentos bastantes toleráveis. Mesmo assim, maior precisão pode ser obtida com a extrapolação de Richardson (DORN & McCRACKEN, 1978). Esta extrapolação exige porém, um esforço computacional dobrado, que normalmente inibe a sua utilização.

XF

XI

5. Sobretensão Devida a Desenergização de Um Reator Shunt.

5.1 O Sistema e as Circunstâncias de Desernergização.

Na fig. 2 é visto um sistema hipotético que seria o próprio Jaguara-Taquaril (fig. II-6) se não fosse o reator manobrável que possui na barra de carga (nó 2).

Este reator, em essência, é igual aquele da barra de geração; possui no entanto, uma capacitância parasita de 33 ηF/Fase e perdas expressas em termos de uma resistência série de 10 Ω/Fase. É conectado ao resto do sistema via um disjuntor de duplo estágio exatamente igual ao de Jaguara (Fig. II-6).

O sistema está operando em regime permanente senoidal, suprindo uma carga de 16 MW e 20 MVAr (indutiva), quando o disjuntor abre nos instantes indicados na tab. II-2.

As características deste novo sistema que não estão explícitas aqui, são aquelas que se conhecem desde a secção II-2.2. O referencial de tempo é o mesmo . As circunstâncias em que ocorre o desligamento do reator, são aqueles sob as quais Jaguara-Taquaril é energizada.

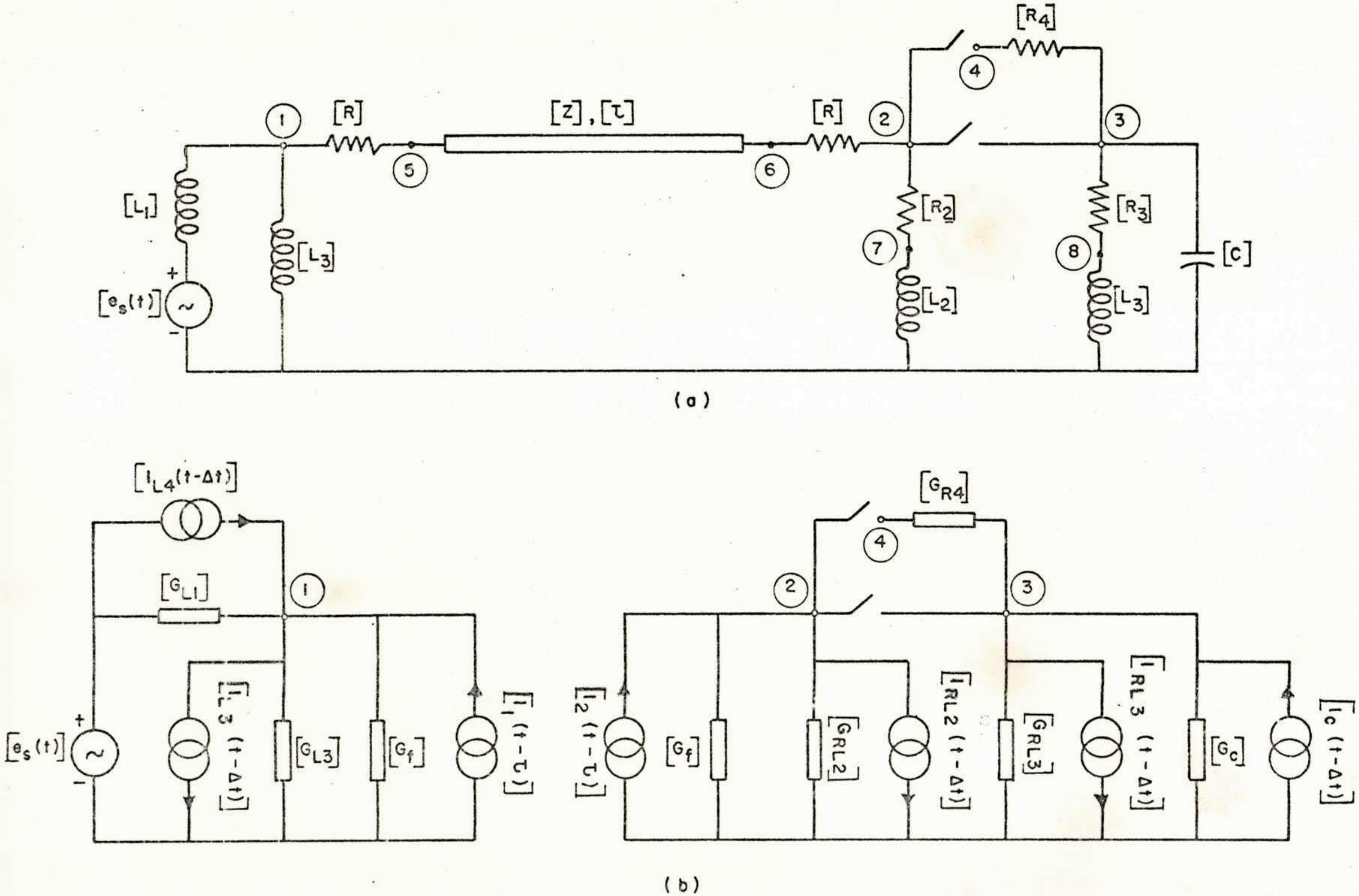


Fig. 2 - (a) Sistema Jaguara-Taquaril modificado. (b) Circuito equivalente.

5.2 Determinação das Condições Iniciais.

Para se conhecer o estado do sistema em regime permanente senoidal, pelo qual as condições iniciais para o cálculo do transitório são determinadas, basta analisar seu circuito de sequência positiva (fig. 3). As equações nodais deste circuito, em forma matricial, são:

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & -\frac{1}{Z_T} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{Z_T} & Y_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Y_{33} & -\frac{1}{R_4} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{R_4} & \frac{1}{R_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_s}{X_{L1}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (1)$$

onde

$$Y_{11} = \frac{1}{X_{L1}} + \frac{1}{X_{L3}} + Y_T + \frac{1}{Z_T}$$

$$Y_{22} = \frac{1}{Z_T} + Y_T + \frac{1}{Z_{RL2}}$$

$$Y_{33} = \frac{1}{R_4} + \frac{1}{Z_{RL3}} + Y_C + \frac{1}{R_4}$$

É claro que antes do desligamento, com o disjuntor fechado, a eq. (1) é muito mais simples:

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & -\frac{1}{Z_T} \\ -\frac{1}{Z_T} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_s}{X_{L1}} \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (2)$$

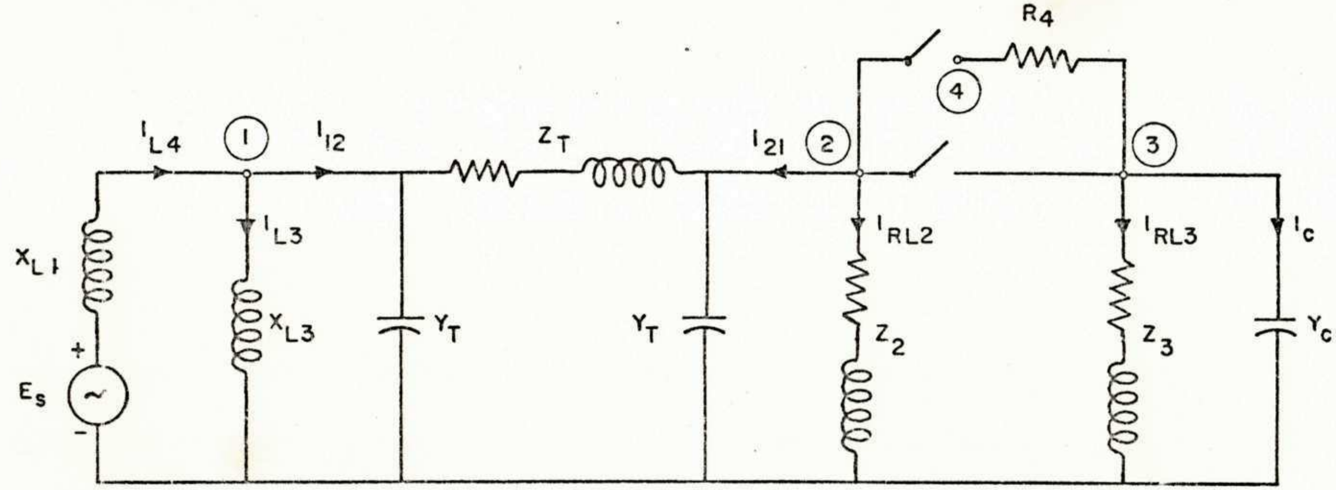


Fig. 3 - Circuito de sequência positiva do sistema da fig. 2.
Linha representada pelo modelo π-nominal.

onde

$$Y_{11} = \frac{1}{X_{L1}} + \frac{1}{X_{L3}} + Y_T + \frac{1}{Z_T}$$

$$Y_{22} = \frac{1}{Z_T} + Y_T + \frac{1}{Z_{RL2}} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{Z_{RL3}} + Y_C$$

O subprograma START, por questão de generalidade, formula o problema conforme a eq. (1); em seguida chama a subrotina FECHY que o particulariza, chegando a eq. (2). Após a resolução desta equação, através da subrotina GAUSC, FECHY iguala as tensões E_3 e E_4 a E_2. Esta generalização, aparentemente complicada, é na verdade simples e útil. Ela é especialmente adequada para um sistema, com vários disjuntores, que seja submetido a diferentes estudos. Um caso assim é matéria do próximo capítulo.

Depois de determinadas as tensões, calculam-se facilmente as correntes no circuito. Até t_0, tempo em que inicia a abertura do disjuntor, a tensão nos terminais do reator é dada por:

$$e_3^a\ (t) = |E_3|\ \cos\ (kt + \Theta_3) \qquad (3a)$$

$$e_3^b\ (t) = |E_3|\ \cos\ (kt + \Theta_3 - \pi/3) \qquad (3b)$$

$$e_3^c\ (t) = |E_3|\ \cos\ (kt + \Theta_3 + \pi/3) \qquad (3c)$$

onde,

$k = 120\ \pi \Delta t$;

$t = 1,\ 2,\ \ldots,\ t_0 - 1$ (tempo em unidades de Δt);

$|E_3|$ = módulo do fasor E_3;

Θ_3 = fase de E_3 em radianos.

A subrotina REGIME faz exatamente isto: fornece o valor instantâneo de um sinal trifásico senoidal, a partir do respectivo fasor de sequência positiva.

No período preliminar ($t < t_0$) todas as tensões e correntes, naturalmente são obtidas por equações análogas as equações (3). Conforme a tab. 1, os valores das fontes correspondente à linha são dados por:

$$\left[I_1(t)\right] = \left[G_F\right] \left[e_2(t)\right] + \left[H_F\right] \left[i_{21}(t)\right]$$

$$\left[I_2(t)\right] = \left[G_F\right] \left[e_1(t)\right] + \left[H_F\right] \left[i_{12}(t)\right]$$

As condições iniciais se completam com a determinação dos valores das fontes de corrente correspondentes aos elementos concentrados, no passo imediatamente anterior ao em que ocorre a primeira abertura ($t = t_0 - 1$):

$$\left[I_{L1}(t)\right] = \left[G_{L1}\right] \left(\left[e_s(t)\right] - \left[e_1(t)\right]\right) + \left[i_{L1}(t)\right]$$

$$\left[I_{L3}(t)\right] = \left[G_{L3}\right] \left[e_1(t)\right] + \left[i_{L3}(t)\right]$$

$$\left[I_{RL2}(t)\right] = \left[G_{RL2}\right] \left[e_2(t)\right] + \left[H_{RL2}\right] \left[i_{RL2}(t)\right]$$

$$\left[I_{RL3}(t)\right] = \left[G_{RL3}\right] \left[e_3(t)\right] + \left[H_{RL3}\right] \left[i_{RL3}(t)\right]$$

$$[I_C(t)] = [G_C]\ [e_3(t)] + [i_C(t)]$$

5.3 Tensão nos Terminais do Reator.

Conforme a fig. 2b, a matriz condutância do sistema e o vetor $[I_{total}]$ são:

$$[G_{AA}] = \begin{bmatrix} [G_{L1}]+[G_f] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [G_f]+[G_{RL2}] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [G_{R4}]+[G_{RL3}]+[G_C] & -[G_{R4}] \\ [0] & [0] & -[G_{R4}] & [G_{R4}] \end{bmatrix}$$

$$[I_{total}] = \begin{bmatrix} [G_{L1}]\ [e_s(t)]+[I_{L1}(t-\Delta t)]+[I_{L2}(t-\Delta t)]+[I_1(t-\tau)] \\ [I_2(t-\tau)]-[I_{RL2}(t-\Delta t)] \\ [I_C(t-\Delta t)]-[I_{RL3}(t-\Delta t)] \\ [0] \end{bmatrix}$$

Em cada passo os valores históricos são atualizados através das fórmulas recursivas da tab. 1.

O maior pico de sobretensão no reator, como era esperado, ocorre na fase c, que é aquela em que a corrente é mais elevada no instante de interrupção. Este pico de sobretensão é de 6.95 p.u., com R_4 = 400Ω/fase (fig. 4) e chega a 7.78 p.u. se não há inserção de resistência antes da interrupção (fig. 5).

Ambas as sobretensões foram calculadas usando-se um intervalo de tempo base igual a 102μs. O mesmo resultado do cálculo da sobretensão de corte foi alcançado de dois modos distintos:

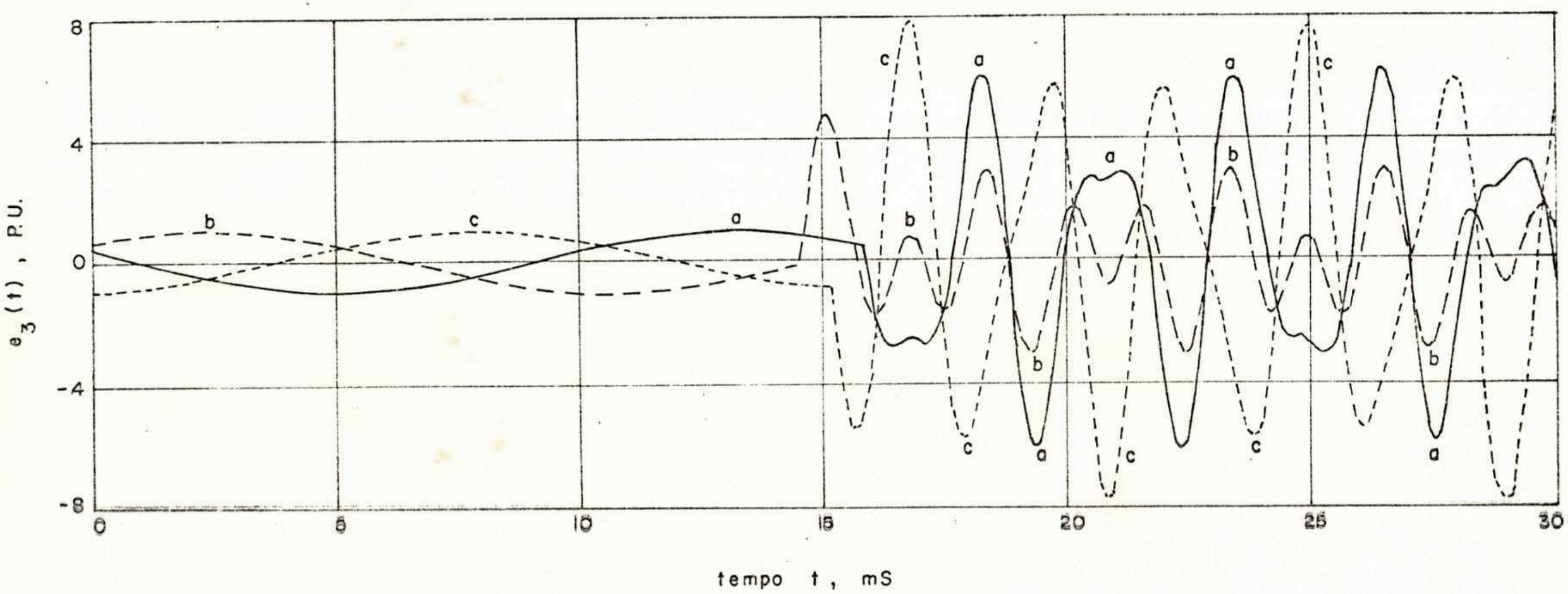


Fig. 4 - Sobretensão no reator provocado por seu desligamento sem pré-inserção de resistência.

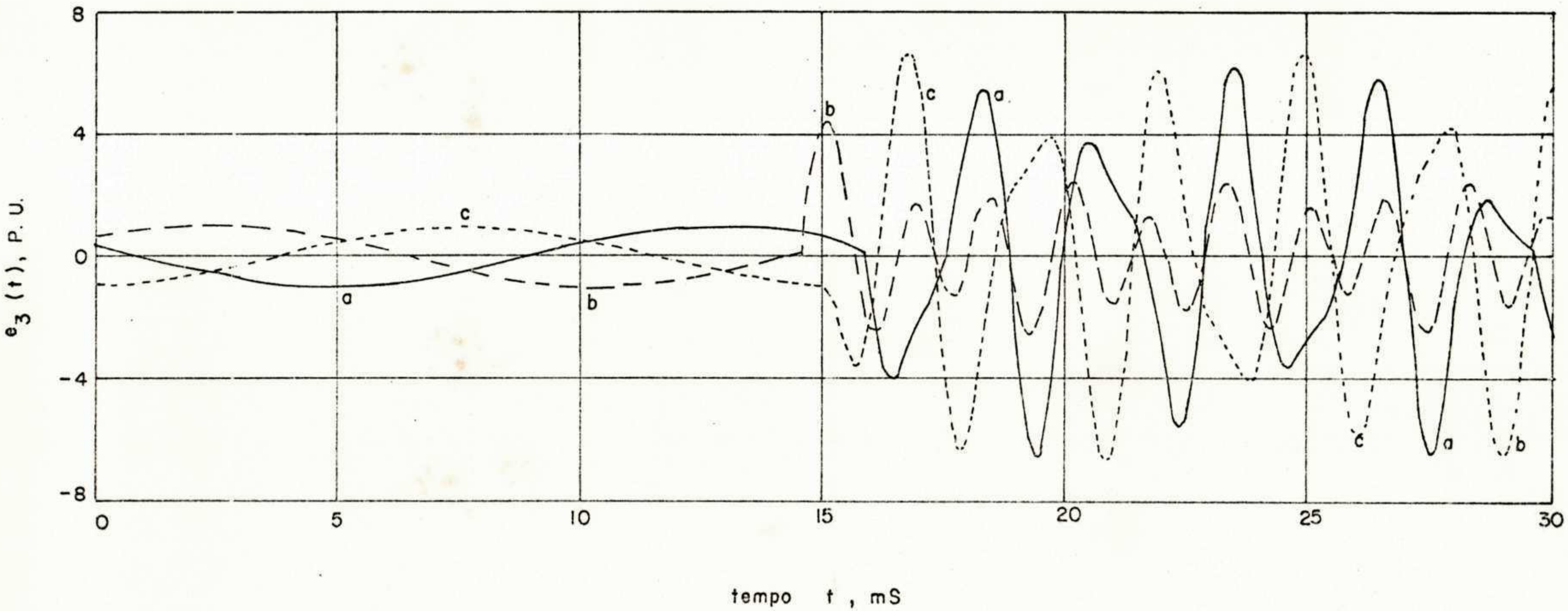


Fig. 5 - Sobretensão no reator provocado por seu desligamento com pré-inserção de resistência.

a - Procedendo-se como no cálculo da sobretensão com resistência de preinserção, substituindo-se o valor de $R_4 = 400\Omega$/fase por um valor ínfimo;

b - com um valor qualquer de R_4, invertendo-se a ordem de abertura das chaves. Isto é, abrindo-se o contato auxiliar antes do principal.

A mesma onda de sobretensão encontrada por um ou outro procedimento comprova o sucesso do processo computacional.

XF

CAPÍTULO IV

AMORTECIMENTO DA SOBRETENSÃO PROVOCADA PELA DESENERGIZAÇÃO DE UM REATOR SHUNT

O problema tratado neste capítulo compreende quatro partes, que em linhas gerais são:

a - Cálculo da sobretensão que ocorre nos terminais de um reator shunt, quando este é subtamente desligado (sobretensão devido ao corte da corrente);

b - Análise da influência da resistência de preinserção do disjuntor agente do desligamento, na sobretensão;

c - Análise do amortecimento da sobretensão através de um circuito RC série (a se instalar em paralelo com o reator);

d - Estudo da possibilidade da sobretensão ser reduzida a nível tolerável por ação combinada da resistência de preinserção e do circuito amortecedor.

1. O sistema e as Circunstâncias do Desligamento.

Este estudo refere-se ao sistema CHESF, que é visto na fig. 1 com o circuito atrás da subestação mais próxima a de Campina Grande, onde se encontra o reator em questão, representado por seu equivalente, do qual se conhecem:

Potência de Curto-circuito trifásico	= 2881 MVA
Potência de Curto-circuito monofásico	= 2729 MVA
Impedância de sequência positiva	= $0{,}0347 \angle 83{,}45^o$ p.u.
Impedância de sequência zero	= $0{,}0407 \angle 76{,}05^o$ p.u.

Estas impedâncias de sequência referidas ao lado de 230 KV, onde a base é

$$Z_{base} = \frac{230^2}{100} = 529\ \Omega \quad ,$$

são

$$Z_1 = 18{,}35 \angle 83{,}45^o\ \Omega$$

$$Z_0 = 21{,}53 \angle 76{,}05^o\ \Omega$$

A partir destes valores, através das relações

$$L_s = \frac{1}{3\omega}\ (X_0 + 2X_1) \qquad (1a)$$

$$L_m = \frac{1}{3\omega}\ (X_0 - X_1) \qquad (1b)$$

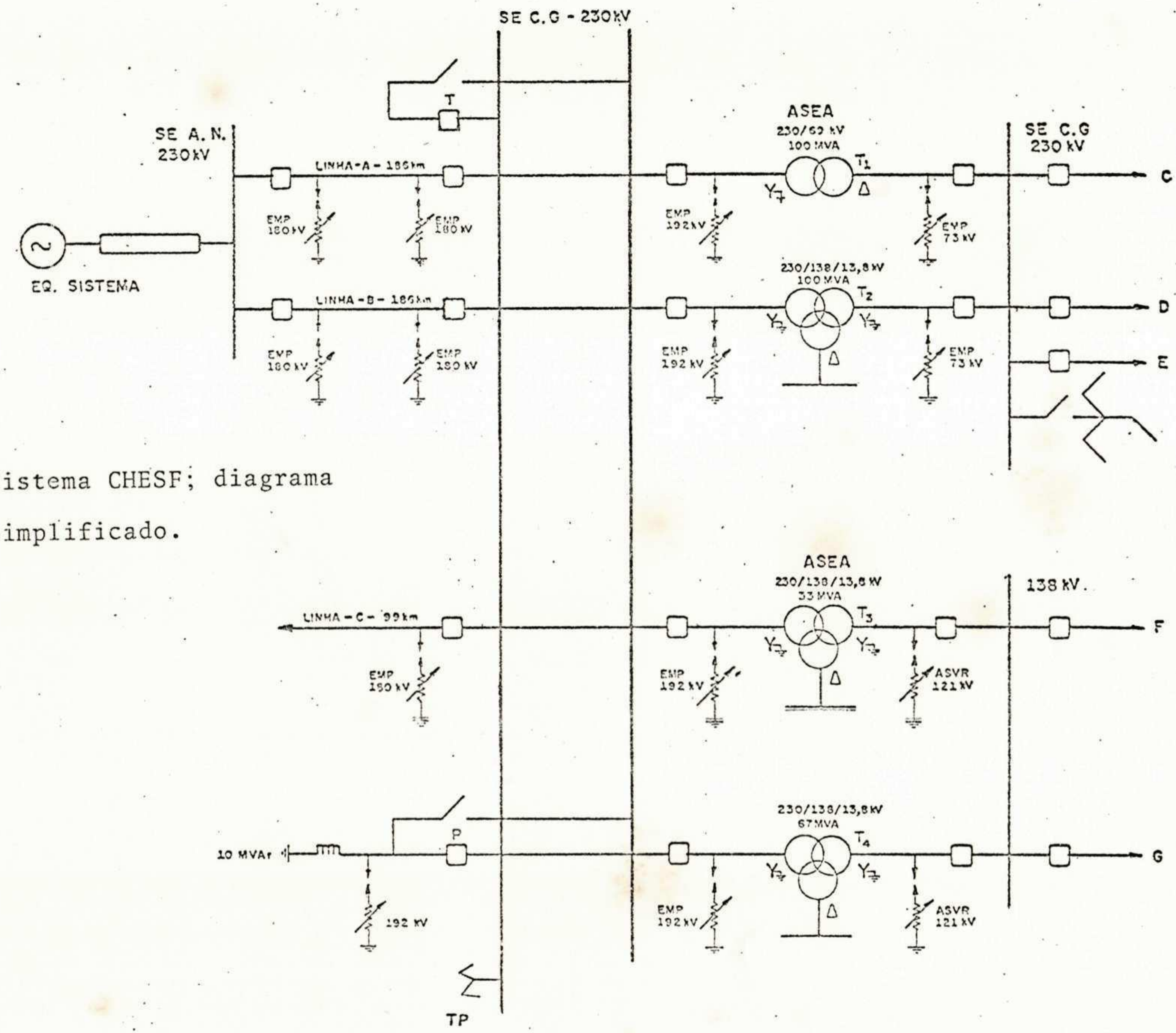


Fig. 1 - Sistema CHESF; diagrama simplificado.

$$R_s = \frac{1}{3}(R_0 + 2R_1) \tag{2a}$$

$$R_m = \frac{1}{3}(R_0 - R_1) \tag{2b}$$

são obtidos os valores das matrizes indutância e resistência deste equivalente:

$L_s = 0{,}0507$ H

$L_m = 0{,}0023$ H

$R_s = 3{,}12\ \Omega$

$R_m = 1{,}03\ \Omega$

A tab. 1 apresenta as características das linhas *A* e *C*. As linhas *A* e *B*, paralelas e idênticas podem ser substituídas, para efeito de simplificação, por uma de igual comprimento com resistência e reatância reduzidas a metade e capacitância igual ao dobro da capacitância da linha *A*.

Na base 100 MVA, a impedância do transformador de dois enrolamentos T_1(230/69 KV - MVA) é X_{AB} = 13,20% e as dos demais são apresentadas na tab. 2.

O reator, de 10 MVAr, tem reatância de sequência positiva de 5470 Ω/fase; é suposto que sua reatância de sequência zero é 35% deste valor e que sua capacitância parasita é igual a 9,66 nF/fase. É manobrado por um disjuntor a grande volume de óleo (disjuntor *P*, na fig. 1) com as seguintes características:

Tempo de interrupção = 3 cilcos,

Corrente nominal = 1200 A,

PARÂMETRO	UNID.	LINHA A	LINHA C
Comprimento	km	186	99
R_1	Ω/km/fase	0,093	0,093
X_1	Ω/km/fase	0,510	0,520
C_1	Ω/km/fase	8,68	8,47
R_0	Ω/km/fase	0,530	0,459
X_0	Ω/km/fase	1,535	1,632
C_0	ηF/km/fase	6,56	6,60

Tab. 1 - Parâmetros das linhas do sistema CHESF reduzido.

			X_{AM}	X_{MB}	X_{BA}
T_2	230/69/13,8 KV	100 MVA	14,17%	5,95%	21,70%
T_3	230/138/13,8 KV	33 MVA	13,16%	5,02%	20,10%
T_4	230/138/13,8 KV	67 MVA	12,90%	7,90%	21,90%

Tab. 2 - Reatância dos transformadores de três enrolamentos do sistema CHESF reduzido (base - 100 MVA).

Capacidade de interrupção simétrica = 10 GVA,

Tensão nominal = 230 KV.

Como não há informações sobre a defasagem nos tempos de aberturas dos contatos, são adotados os mesmos do disjuntor de *Jaguara* (tab. II-2).

Por hipótese, no momento da desenergização a linha C está em vazio; os transformadores estão operando com 75% da sua capacidade nominal e fator de potência igual a 0,8 atrasado. Isto é, a carga de todos eles tem impedância, com base nos respectivos valores nominais,

$$Z_L = \frac{0,8 + j0,6}{0,75} = 1,067 + j0,8 \text{ p.u.}$$

Com esta carga, as impedâncias de sequências do transformador de dois enrolamentos são:

$$Z_0 = jX_T = j0,132 \text{ p.u.}$$

$$Z_1 = R_L + j(X_L + X_T) = 1,067 + j0,932 \text{ p.u.}$$

Na base 100 MVA, as impedâncias das cargas dos transformadores de três enrolamentos são

$$Z_L = R_L + jX_L = \frac{100}{0,75.S_N} (0,8 + j0,6)$$

onde, S_N é a capacidade nominal (MVA) do transformador. Nesta mesma base, as impedâncias de sequências dos transformadores de três enrolamentos em carga são dadas por

$$Z_1 = R_L + j(X_A + X_B + X_L) \text{ p.u.}$$

$$Z_0 = jX_A + \cfrac{1}{\cfrac{1}{jX_M} + \cfrac{1}{R_L + j(X_B + X_L)}} \qquad (3)$$

onde

$$X_A = \frac{X_{AB} + X_{AM} - X_{BM}}{2} \text{ p.u.}$$

$$X_B = \frac{X_{AB} + X_{BM} - X_{AM}}{2} \text{ p.u.}$$

$$X_M = \frac{X_{AM} + X_{BM} - X_{AB}}{2} \text{ p.u.}$$

são as impedâncias do modelo do transformador de três enrolamentos. Os valores de X_{AB}, X_{AM} e X_{BM} são os da tab. 2.

Como X_M em valor absoluto, é muito menor que R_L, X_B e X_L, em vez da eq. (3) se pode usar

$$Z_0 \simeq j(X_A + X_M) \text{ p.u.}$$

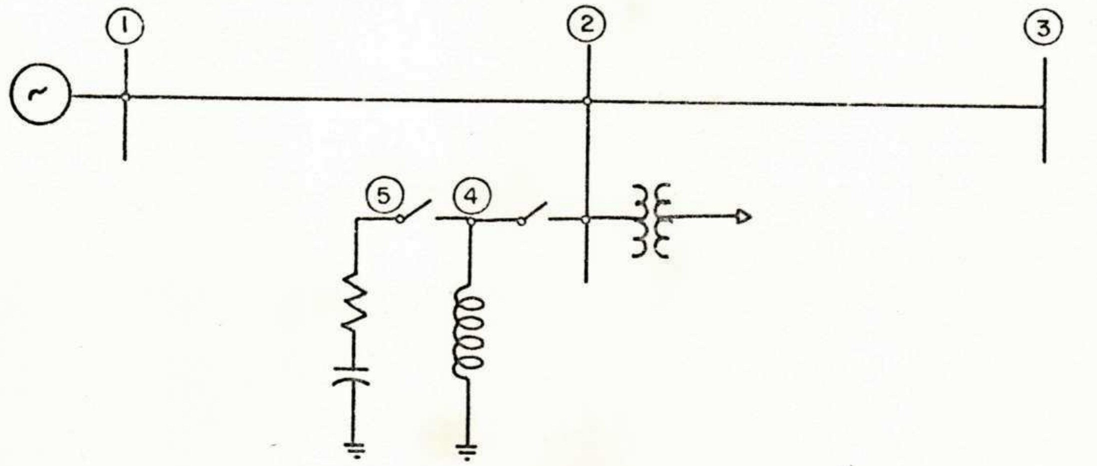
Referindo-se a 230 KV, as impedâncias dos transformadores são

	$Z_0(\Omega)$	$Z_1(\Omega)$
T_1	j 69,8	564,3 + j 493,0
T_2	j 74,9	564,3 + j 538,0
T_3	j 69,6	1709,9 + j1388,7
T_4	j 68,2	842,2 + j 743,4

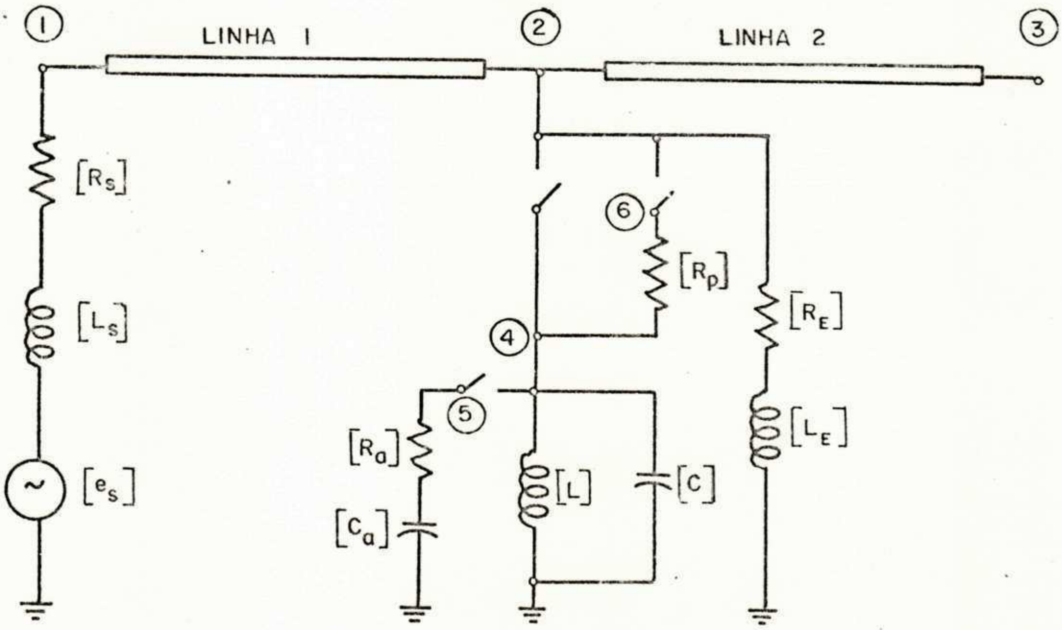
Com todas as considerações anteriores e substituindo-se os transformadores por um único equivalente, a fig. 1 se reduz a fig. 2a. A partir dos valores das impedâncias de sequências deste equivalente ($Z_0 = j\ 17,6\ \Omega$ e $Z_1 = 188,0 + j\ 165,7\ \Omega$), através das equações (1) e (2), se determinam os elementos das duas matrizes resistências e indutância ($[R_2]$ e $[L_2]$ na fig. 4b). Estes Elementos são:

$$R_s = 125,3\ \Omega$$
$$R_m = -62,7\ \Omega$$
$$L_s = 0,307\ \text{H}$$
$$L_m = -0,131\ \text{H}$$

Na fig. 2b, $[L]$ é a matriz indutância do reator. As matrizes correspondentes aos parâmetros do circuito amortecedor, $[R_a]$ e $[C_a]$, à capacitância parasita, $[C]$; e à resistência de preinserção $[R_p]$, são diagonais.



(a)



(b)

Figo. 2 - (a) Sistema da fig. 1 simplificado.
(b) Representação esquemática.

2. A Simulação Digital e a Solução do Problema.

Há maior comodidade na resolução do problema, descrito no início do capítulo, formulando-o de maneira global. Isto é possível supondo que o sistema já possua o circuito amortecedor RC (fig. 2a). Deste modo, se constroi uma única matriz condutância original, que se adapta a todas as etapas do problema. As condições iniciais são obtidas em cada estágio, de maneira análoga àquela da secção (III-3.3); a análise em regime permanente senoidal é efetuado uma única vez, sendo o resultado preservado e reutilizado sempre que necessário. Em todas as etapas se utilizou um intervalo básico de tempo de 80 μs.

Antes de mais nada deve-se ter conhecimento da sobretensão natural nos terminais do reator, que ocorre quando sua desenergização se dá isenta de qualquer amortecimento. Referindo-se ao circuito da fig. 2, isto corresponde a simular a abertura de chave (2-4), sendo mantidas abertas, as chaves (2-6) e (4-5). A fig. 3 mostra o resultado desta simulação. A sobretensão instantânea máxima é de 5.6 p.u. Não se verifica nenhuma atenuação na onda de sobretensão. Isto por não haver meio de dissipar a energia armazenada no reator quando se deu o desligamento (as perdas no reator não foram incluidas no circuito da fig. 2).

No sentido de se conhecer a influência da resistência de preinserção na sobretensão, simulou-se a abertura sequencial das chaves (2-4) e (2-6), com a chave (2-5) mantida aberta (fig. 2). Diferentes valores de resistência de preinserção R_p, foram adotados para que a curva da fig. 4 fosse definida. Esta figura mostra que o valor ótimo de R_p está na vizinhança de 3.500 Ω. Valores extre-

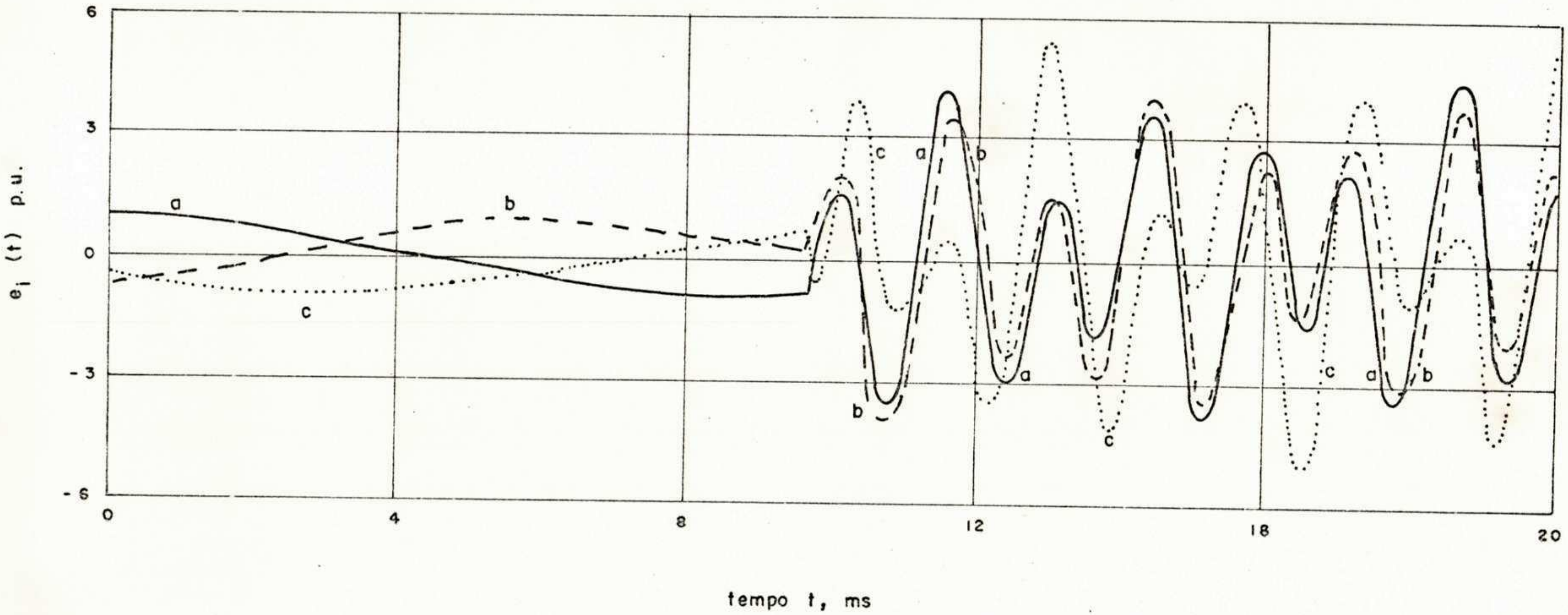


Fig. 3 - Sobretensão devida ao desligamento do reator, sem amortecimento.

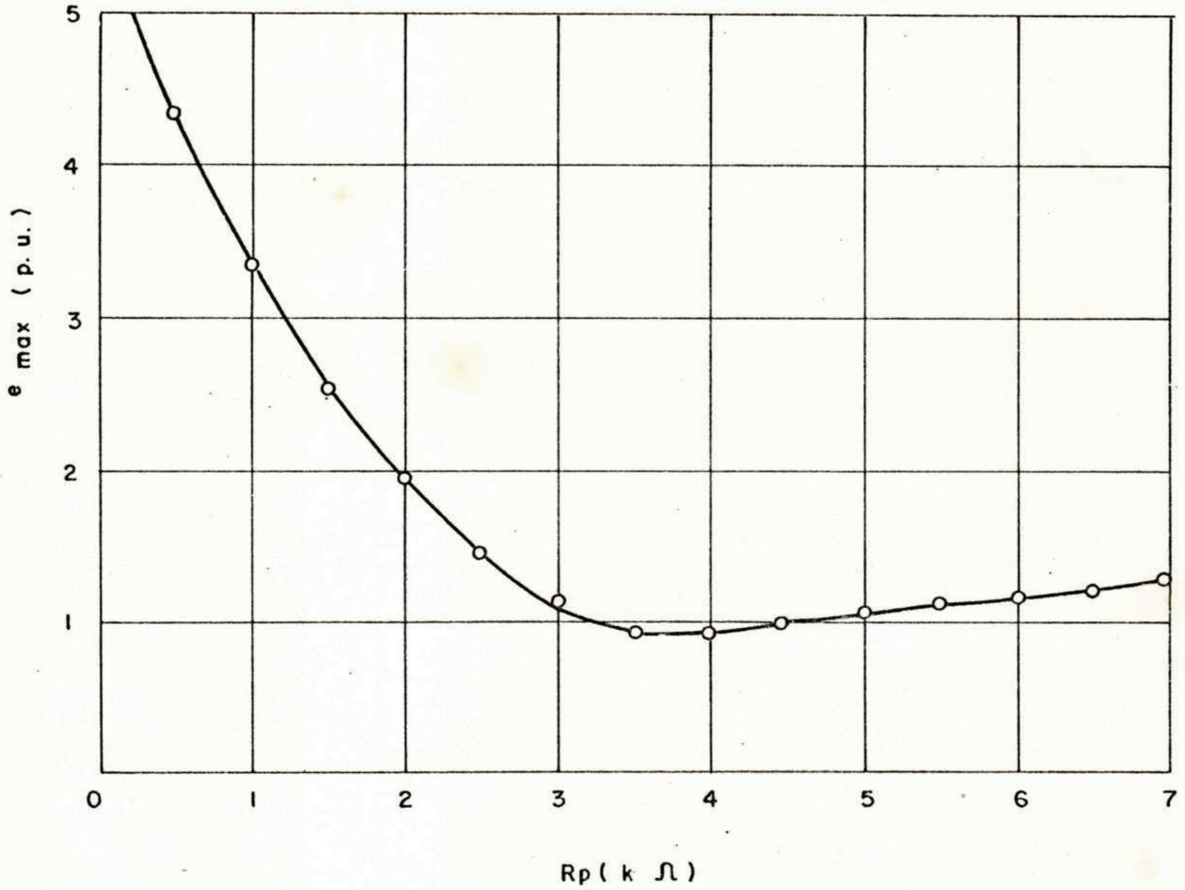


Fig. 4 - Variação da sobretensão instantânea máxima com o valor da resistência de preinserção.

$R_a(\Omega)$	SOBRETENSÃO MÁXIMA (p.u.)		
	C_a = 10 ηF	C_a = 15 ηF	C_a = 20 ηF
500,	2,32	2,10	1,92
1000,	2,23	2,08	1,89
1500,	2,17	2,05	1,88
2000,	2,15	2,03	1,86
2500,	2,13	2,01	1,84

Tab. 3 - Variação da sobretensão instantânea máxima com a resistência do circuito amortecedor (R_p = 1000 Ω, 1.0 p.u. = 230 $\sqrt{2}/\sqrt{3}$ kV).

C_a(ηF)	SOBRETENSÃO MÁXIMA (p.u.)
5,0	2,70
10,0	2,23
15,0	2.07
20,0	1,90
25,0	1,73

Tab. 4 - Variação da sobretensão instantânea máxima com a capacitância do circuito amortecedor (R_a = = R_p = 1000 Ω; 1.0 p.u. = 230 $\sqrt{2}/\sqrt{3}$ kV).

mos de R_p tem as mesmas consequências: o pico de sobretensão (e_{max}) é igual 5,6 p.u. se $R_p \to 0$ e 6,7 p.u. se $R_p \to \infty$.

Para se verificar a influência dos parâmetros do circuito amortecedor, calculam-se os picos de sobretensão devido a abertura sequencial das chaves (2-4) e (2-6) com a chave (4-5) tendo sido previamente fechada e sendo mantida nesta posição. Esta simulação foi repetida, sempre com R_p = 1000 Ω, variando-se os parâmetros do circuito amortecedor. Os resultados são apresentados nas tabelas 3 e 4.

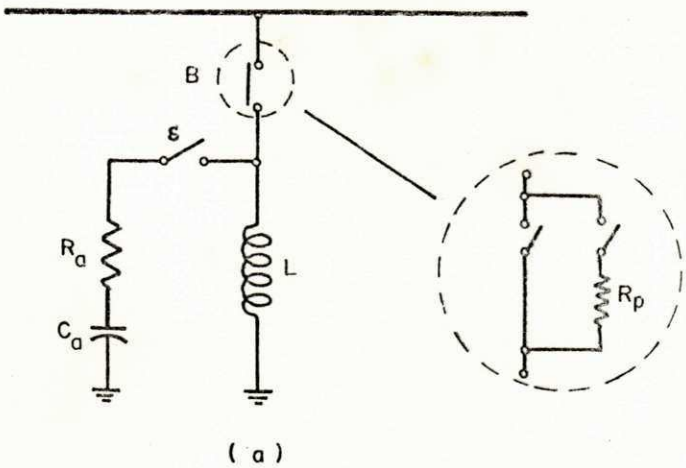
Observou-se que a resisitência de préinserção R_p, causa uma atenuação na onda de sobretensão sem influênciar substancialmente os picos iniciais. A resistência R_a do circuito amortecedor, também age deste modo. Ao contrário, a capacitância C_a controla a sobretensão desde o primeiro pico.

Com base no resultado do estudo, sugere-se para reduzir a sobretensão ao nível tolerável 2,2 p.u., que sejam adotados os seguintes valores: $R_p = R_a$ = 1000 Ω e C_a = 10 ηF.

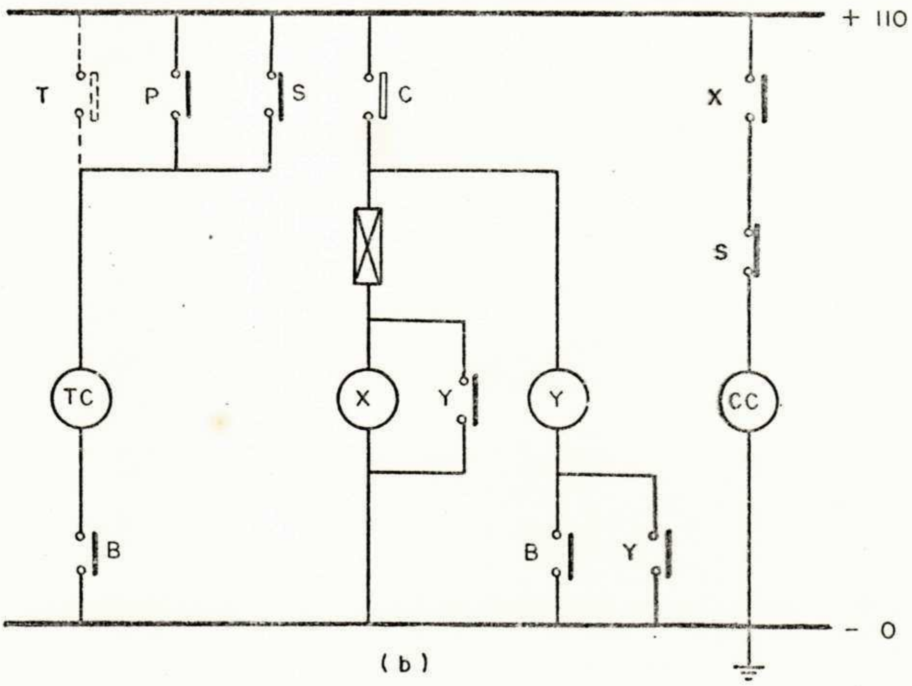
As modificações necessárias no circuito de acionamento do disjuntor para se adaptar os elementos de amortecimento, são discutidas na secção seguinte.

3. Implementação dos Meios de Amortecimento Estudados.

Foi mostrado que uma das técnicas para amortecimento de tensões transitórias devidas a desenergização, é a conecção temporária de um circuito *RC* série aos terminais do reator. O esquema básico é visto na fig. 5a. O circuito amortecedor não está li-



(a)



(b)

Fig. 5 - (a) Esquema básico de chaveamento do reator. (b) Circuito típico de controle de disjuntor.

gado ao reator quando este estiver energizado, isto é, em operação normal. Para desenergizar o reator, a chave S é fechada e o disjuntor é automaticamente aberto. O fechamento subsequente do disjuntor, somente é possível quando a chave S voltar a estar aberta.

A fig. 5b mostra um esquema típico de controle de disjuntor, conhecido como esquema de relé X-Y. A bateria da subestação fornece potência para fechamento e abertura. As chaves de controle aplicam a bateria à bobina de abertura. O relé X-Y evita o fenômeno de *pumping* e torna a operação do disjuntor segura. O contato de fechamento da chave de controle (C) aciona o relé X que energiza a bobina de fechamento do disjuntor. Quando o disjuntor fica completamente aberto, um contato auxiliar do disjuntor (B), energiza o relé Y que sela através de seus próprios contatos. O contato do relé Y desenergiza o relé X, que abre e interrompe assim, a corrente na bobina de fechamento. Se o disjuntor é acionado automaticamente quando ocorre uma falta, ele abre e não volta a fechar-se sem que o operador ponha a chave de controle na posição fechada. O relé X continua curto-circuitado pelo contato do relé Y até que a chave de controle retorne a posição neutra.

A fig. 5b também mostra o esquema de controle para incluir o controle lógico proposto no primeiro parágrafo. Um contato S, normalmente aberto (isto é, aberto quando a chave de isolamento S está aberta), é conectada em lugar do contato de abertura T da chave de controle. Um contato normalmente fechado da chave S é conectado em série com a bobina de fechamento do disjuntor. Assim quando a chave S é fechada, o disjuntor é automaticamente aberto e o fechamento é impedido até à abertura da chave S.

CONCLUSÕES

Transitórios consequentes da desenergização de reatores shunt foram calculados. A atenuação destes transitórios por ação de resistores de preinserção e de amortecedor RC foi investigado. Um programa de computador desenvolvido segundo o método de Dommel foi usado. Simplificação e economia foram conseguidos no esforço computacional adotando-se modelo para linha que já incluisse as perdas. Estas vantagens foram ampliadas ao se considerar como ramos únicos, indutâncias ou capacitâncias em série com resistências.

No primeiro estudo realizado, referente a linha *Jaguara-Taquaril*, um intervalo base de 102μs foi utilizado, dando bons resultados. Quando a corrente no reator foi interrompida sem inserção prévia de resisitência, a sobretensão alcançou 7,8 p.u. Este valor foi reduzido para 6,9 p.u. usando-se uma resisitência de preinserção de 400 Ω/fase.

Ao ser desenergizado o reator do sistema CHESF (segundo estudo realizado), a sobretensão chegou a 5,6 p.u. Com resistência de preinserção de 1000Ω, este pico baixou para 3,2 p.u. Com esta resistência, sugere-se que os parâmetros do circuito amortecedor sejam escolhidos iguais a 1000Ω e 10ηF. Assim a sobretensão máxima será da ordem de 2,2 p.u.; o que é aceitável. Neste estudo foi usado um Δt = 80μs.

Observou-se que a capacitância do circuito amortecedor controla a sobretensão desde os primeiros picos. As resistências tanto a de preinserção quanto a do circuito amortecedor não influenciam substancialmente os picos iniciais.

Circuito amortecedor RC combinado com resistor de preinserção mostrou-se um vigoroso meio de atenuar transitórios devidos ao corte de corrente. Porém não há garantia de que esta, seja a estratégia ótima para resolver o problema. Para se ter esta certeza, é necessário que o amortecimento da sobretensão via pára-raio também seja estudado. É conveniente que estas técnicas sejam confrontadas, inclusive levando-se em conta, o fator econômico.

REFERÊNCIAS

BERNERYD, S.; SÖLVER, C.E.; AHLGREN L., ERIKSON, R. Switching of shunt reators - comparation between field and laboratory test, *CIGRE*, Report 13-04, 1976.

BURGER, U. Lightning arresters for limiting overvoltages on disconecting shunt reactores, *Brown Boveri Review*. v. 62, 4: 176-181, 1975.

DAMSTRA, G.C. Influence of circuits parameters on current chopping and overvoltages in indutive M. V. circuits. *CIGRE*, Report 13-08, 1976.

DOMMEL, H.W. Method for solving transient phenomena in multiphase system. *Proc. 2nd Power System Computation Conference*. Report 5-8, Stockholm, Sweden, 1966.

——— Digital computer solution of eletromagnetic transients in single - and multiphase networks. *IEEE Trans.*, v. PAS-88, 4: 388-395, 1969.

DOMMEL & CUNHA, C.A.F. Reprodução por computador de testes de campo na linha Jaguara-Taquaril de 345 kV. *II Seminário Nacional de Geração e Transmissão de Energia Elétrica.* Belo Horizonte, 1973.

——— & MEYER W.S Computation of eletromagnetic transients. *Proc. IEEE*, 62: 983-993, 1974.

DORN, W.S. & McCRACKEN, D.D. Numerical methods with fortran IV case studies. New York, John Wiley & Sons, 1972, 447 p.

GARDNER, G.E. & URWING R.J. Arc instability and current chopping in an air-blast interrupter. *Proc. IEE* v. 124, 7: 619-627, 1977.

———————, Performance and testing of multi-unit circuit-breakers switching low inductive currentes. *Proc. IEE*, v. 125, 3: 230-236, 1978.

LEE, T.H. & GREENWOOD, A. The effet of current chopping in circuit-breakers on networks and transformers. *AIEE Trans.*, 79: 535-555, 1960.

MURAND, M.; YANABU, S.; OHASHI, H.; ISHIZUKA, H. & OKAZAKI, T. Current chopping phenomena of medium voltage circuit-breakers. *IEEE Trans.*, v. PAS-96, 1: 143-149, 1977.

NAIDU, S.R. Sobretensões em sistemas de potência. Campina Grande, *Deptº de Eng. Elétrica da UFPb*, publicação interna, 1979.

SARKINEN, S.R.; SCHOCKELT, G.G. & BRUNKE, J.H. High frequency switching surges in EHV shunt reactor installation with reduced insulation levels. *IEEE Trans.*, v. PAS-98, 3: 1013-1021, 1979.

SLAMECKA, E. Interruption of small inductive currents. *CIGRE* Report 13-02, 1980.

APÊNDICE

O PROGRAMA TRANAL

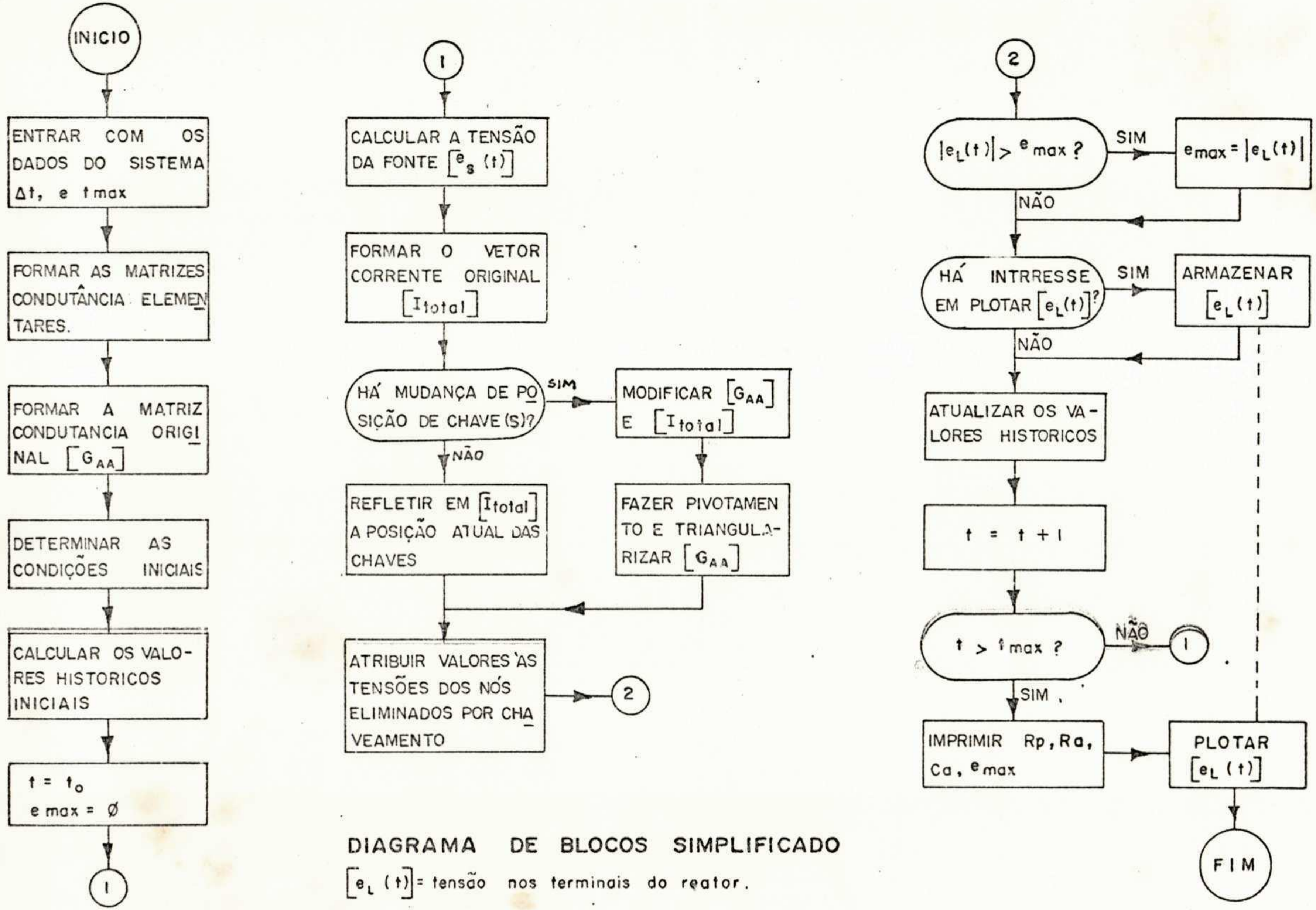


DIAGRAMA DE BLOCOS SIMPLIFICADO

$[e_L(t)]$ = tensão nos terminais do reator.

```
$JOB            TRANAL,PAGES=50,TIME=5,LINES=69
$NOEXT
      IMPLICIT   LOGICAL(Q)
      COMMON     /EPS/ QSTART,QINTER,QNOREL,QPRE
      QSTART=.TRUE.
      QINTER=.FALSE.
      QNOREL=.TRUE.
      QPRE=.FALSE.
      CALL PRINC(1000.,1000.,10.E-9,0.)
      STOP
      END
C     ------------------------------------------------------------------
C     PRINC   EH O CENTRO DO PROGAMA.
C     ------------------------------------------------------------------
      SUBROUTINE PRINC(R4,R5,C5,SUPER)
      IMPLICIT   INTEGER(T),COMPLEX(F)
      LOGICAL    IND,PRIMA,QPLOT,QSTART,QINTER,QNOREL,QPRE
      DIMENSION  S(3,3),S1(3,3),UM(3,3),TVA(3),TVB(3),Y(4,400),
     +           A(20,20),X(20),P(20,20),JPIV(20),
     +           ES(3),E1(3),E2(3),E3(3),E4(3),E5(3),E6(3),
     +           AVE(3),AMA(3,3),HAF(3,3),HBF(3,3),
     +           URL1(3,3),URL2(3,3),URC5(3,3),UGA(3,3),UGB(3,3)
      REAL       IRL1(3),I12(3),I21(3),IRL2(3),IL4(3),IC4(3),IRC5(3),
     +           I23(3),I32(3),I24(3),I26(3),IT4(3),FATOR,NIVEL/1./
      DIMENSION  RR1(3,3),RL1(3,3),          GRL1(3,3),HRL1(3,3),
     +           GR4(3,3),GL4(3,3),GC4(3,3),
     +           RR2(3,3),RL2(3,3),          GRL2(3,3),HRL2(3,3),
     +           RR5(3,3),          RC5(3,3),GRC5(3,3),HRC5(3,3),
     +           GA (3,3),GAF(3,3),HA (3,3),JA1(3,400),JA2(3,400),
     +           GB (3,3),GBF(3,3),HB (3,3),JB2(3,400),JB3(3,400)
      COMMON/PS/ FES,FE1,FE2,FE3,FE4,FE5,FE6,
     +           FI12,FI21,FIL4,FIC4,FIRC5,FIRL2,FI23,FI32,FI24,FI26,
     +           FES1/PF/A,  N /PR/DELTA /PP/Y,YMAX,YMIN,QPLOT
     +           /EPS/QSTART,QINTER,QNOREL,QPRE
      EQUIVALENCE(E1(1),X( 1)),(E2(1),X( 4)),(E3(1),X( 7)),
     +           (E4(1),X(10)),(E5(1),X(13)),(E6(1),X(16))
      DATA S /4*1.     ,-2.      ,3*1.,-2./,P,X/420*0./,
     +     S1/4* .33333,- .33333,  0.,  .33333,0.,-.33333/,
     +     UM/1.,3*0.,1.,3*0.,1./,
     +     DELTA,TVA,TVB /80.E-6,12,8,8,6,4,4/,
     +     T0,TPARE/12,250/
      DELTB=2./DELTA ;    DELTC=DELTA/2.   ;   FATOR=0.
      IF(SUPER .NE. 0.) FATOR=50./SUPER
      QPLOT=.FALSE. ;      YMAX=YMIN=0. ;       N=18
C
      T241=T0+16 ;  T261=T0+110
      T242=T0    ;  T262=T0+ 90
      T243=T0+10 ;  T263=T0+100
C
C20    FORMACAO DAS MATRIZES ELEMENTARES.
C
      CALL GERMM(GA,4.95E-3,2.39E-3)
      CALL GERMM(GB,2.50E-3,1.23E-3)
      CALL GERMM(HA, .956, .882)
      CALL GERMM(HB, .978, .939)
      CALL PROMM(GAF,GA,S1 )
      CALL PROMM(GAF,S ,GAF)
      CALL PROMM(GBF,GB,S1 )
      CALL PROMM(GBF,S ,GBF)
C
      CALL GERFF(RR1,3.12  ,1.03  ,1.   )
      CALL GERFF(RL1, .0507, .0023,DELTB)
      CALL SOMAM(GRL1,RL1,RR1)
      CALL INVER(GRL1,GRL1)
      CALL SUBTM(HRL1,RL1 ,RR1 )
      CALL PROMM(HRL1,GRL1,HRL1)
C
      CALL GERFF(GR4,1./R4,0.,1.)
      CALL GERFM(GL4,14.5,5.08,DELTB)
```

```
      CALL INVER(GL4,GL4)
      CALL GERFF(GC4,9.66E-9,0.,DELTB)
C
      CALL GERFF(RR2,125.3,-62.7,1.   )
      CALL GERFF(RL2, .309,-.131,DELTB)
      CALL SOMAM(GRL2,RL2,RR2)
      CALL INVER(GRL2,GRL2)
      CALL SUBTM(HRL2,RL2,RR2)
      CALL PROMM(HRL2,GRL2,HRL2)
C
      CALL GERFF(RR5,R5,0.,1.)
      CALL GERFF(RC5,C5,0.,DELTB)
      CALL INVER(RC5,RC5)
      CALL SOMAM(GRC5,RC5,RR5)
      CALL INVER(GRC5,GRC5)
      CALL SUBTM(HRC5,RC5,RR5)
      CALL PROMM(HRC5,GRC5,HRC5)
C
C25   FORMACAO DA MATRIZ CONDUTANCIA ORIGINAL.
C
      DO 252 I=1,3
         DO 251 J=1,3
            P(I,J)=GRL1(I,J)+GAF(I,J)
            P(I+ 3,J+ 3)= GAF(I,J)+GBF(I,J)+GRL2(I,J)
            P(I+ 6,J+ 6)= GBF(I,J)
            P(I+ 9,J+ 9)= GR4(I,J)+GL4(I,J)+GC4(I,J)
            P(I+12,J+12)= GRC5(I,J)
            P(I+15,J+15)= GR4(I,J)
            P(I+ 9,J+15)=-GR4(I,J)
            P(I+15,J+ 9)=-GR4(I,J)
 251     CONTINUE
 252  CONTINUE
C
C30   DETERMINACAO DAS CONDICOES INICIAIS.
C
      CALL START(R4,R5,C5)
      CALL REGIME(T242,FES  ,ES  )
      CALL REGIME(T242,FE1  ,E1  )
      CALL REGIME(T242,FE2  ,E2  )
      CALL REGIME(T242,FE4  ,E4  )
      CALL REGIME(T242,FE5  ,E5  )
      CALL REGIME(T242,FI12 ,I12 )
      CALL REGIME(T242,FIL4 ,IL4 )
      CALL REGIME(T242,FIC4 ,IC4 )
      CALL REGIME(T242,FIRC5,IRC5)
      CALL REGIME(T242,FIRL2,IRL2)
      CALL SUBTV(AVE,ES  ,E1 )
      CALL PROMV(AVE,GRL1,AVE) :    CALL SUBTV(IRL1,I12 ,AVE )
      CALL PROMV(AVE,GL4 ,E4 ) :    CALL SUBTV(IL4 ,IL4 ,AVE )
      CALL PROMV(AVE,GRL2,E2 ) :    CALL SUBTV(IRL2,IRL2,AVE )
      CALL PROMV(AVE,GC4 ,E4 ) :    CALL SUBTV(IC4 ,AVE ,IC4 )
      CALL PROMV(AVE,GRC5,E5 ) :    CALL SUBTV(IRC5,AVE ,IRC5)
C
C35   MATIZES ELEMENTARES AUXILIARES.
C
      CALL PROMM(GAF,GA,S1)
      CALL PROMM(HAF,HA,S1)
      CALL PROMM(GBF,GB,S1)
      CALL PROMM(HBF,HB,S1)
C
      CALL SOMAM(URL1,UM  ,HRL1)
      CALL PROMM(URL1,URL1,GRL1)
      CALL SOMAM(URL2,UM  ,HRL2)
      CALL PROMM(URL2,URL2,GRL2)
      CALL SOMAM(URC5,UM  ,HRC5)
      CALL PROMM(URC5,URC5,GRC5)
C
      CALL SOMAM(UGA,UM,HA )
      CALL PROMM(UGA,GA,UGA)
```

```
      CALL PROMM(UGA,UGA,S1)
      CALL SOMAM(UGB,UM,HB )
      CALL PROMM(UGB,GB,UGB)
      CALL PROMM(UGB,UGB,S1)
C
C
C40   PROCESSO RECURSIVO.
C
      DO 401 T=1 ,T242
         EXECUTE NEOCOP
         EXECUTE MONTE
 401  CONTINUE
C
      PRIMA=.TRUE.
      TI=T
      DO 402 T=TI,T243
         EXECUTE CORIG
         IF (PRIMA) THENDO
            EXECUTE COPIA
            CALL FECHE(6,18,X)
            CALL FECHE(5,17,X)
            CALL FECHE(4,16,X)
            IF (QPRE) EXECUTE RFE45
            CALL FECHE(6,12,X)
            CALL FECHE(4,10,X)
            CALL LUSOLV(A,X,N,JPIV)
            PRIMA=.FALSE.
         ELSEDO
            CALL FECHX(6,18,X)
            CALL FECHX(5,17,X)
            CALL FECHX(4,16,X)
            IF (QPRE) EXECUTE RFX45
            CALL FECHX(6,12,X)
            CALL FECHX(4,10,X)
            CALL FWBWC(A,X,N,JPIV)
         ENDIF
         CALL ABREX(4,10,X)
         CALL ABREX(6,12,X)
         IF (QPRE) EXECUTE RAB45
         CALL ABREX(4,16,X)
         CALL ABREX(5,17,X)
         CALL ABREX(6,18,X)
         EXECUTE NEOCOT
         EXECUTE MONTE
 402  CONTINUE
C
      PRIMA=.TRUE.
      TI=T
      DO 403 T=TI,T241
         EXECUTE CORIG
         IF (PRIMA) THENDO
            EXECUTE COPIA
            CALL FECHE(6,18,X)
            CALL FECHE(5,17,X)
            CALL FECHE(4,16,X)
            IF (QPRE) EXECUTE RFE45
            CALL FECHE(4,10,X)
            CALL LUSOLV(A,X,N,JPIV)
            PRIMA=.FALSE.
         ELSEDO
            CALL FECHX(6,18,X)
            CALL FECHX(5,17,X)
            CALL FECHX(4,16,X)
            IF (QPRE) EXECUTE RFX45
            CALL FECHX(4,10,X)
            CALL FWBWC(A,X,N,JPIV)
         ENDIF
         CALL ABREX(4,10,X)
         IF (QPRE) EXECUTE RAB45
```

```
      CALL ABREX(4,16,X)
      CALL ABREX(5,17,X)
      CALL ABREX(6,18,X)
      EXECUTE NEOCOT
      EXECUTE MONTE
 403  CONTINUE
C
      PRIMA=.TRUE.
      TI=T
      DO 404 T=TI,T262
         EXECUTE CORIG
         IF (PRIMA) THENDO
            EXECUTE COPIA
            CALL FECHE(6,18,X)
            CALL FECHE(5,17,X)
            CALL FECHE(4,16,X)
            IF (QPRE) EXECUTE RFE45
            CALL LUSOLV(A,X,N,JPIV)
            PRIMA=.FALSE.
         ELSEDO
            CALL FECHX(6,18,X)
            CALL FECHX(5,17,X)
            CALL FECHX(4,16,X)
            IF (QPRE) EXECUTE RFX45
            CALL FWBWC(A,X,N,JPIV)
         ENDIF
         IF (QPRE) EXECUTE RAB45
         CALL ABREX(4,16,X)
         CALL ABREX(5,17,X)
         CALL ABREX(6,18,X)
         EXECUTE NEOCOT
         EXECUTE MONTE
 404  CONTINUE
C
      PRIMA=.TRUE.
      TI=T
      DO 405 T=TI,T263
         EXECUTE CORIG
         IF (PRIMA) THENDO
            EXECUTE COPIA
            CALL FECHE(6,18,X)
            CALL FECHE(4,16,X)
            IF (QPRE) EXECUTE RFE45
            CALL LUSOLV(A,X,N,JPIV)
            PRIMA=.FALSE.
         ELSEDO
            CALL FECHX(6,18,X)
            CALL FECHX(4,16,X)
            IF (QPRE) EXECUTE RFX45
            CALL FWBWC(A,X,N,JPIV)
         ENDIF
         IF (QPRE) EXECUTE RAB45
         CALL ABREX(4,16,X)
         CALL ABREX(6,18,X)
         EXECUTE NEOCOT
         EXECUTE MONTE
 405  CONTINUE
C
      PRIMA=.TRUE.
      TI=T
      DO 406 T=TI,T261
         EXECUTE CORIG
         IF (PRIMA) THENDO
            EXECUTE COPIA
            CALL FECHE(4,16,X)
            IF (QPRE) EXECUTE RFE45
            CALL LUSOLV(A,X,N,JPIV)
            PRIMA=.FALSE.
         ELSEDO
```

```
            CALL FECHX(4,16,X)
            IF (QPRE) EXECUTE RFX45
            CALL FWBWC(A,X,N,JPIV)
         ENDIF
         IF (QPRE) EXECUTE RAB45
         CALL ABREX(4,16,X)
         EXECUTE NEOCOT
         EXECUTE MONTE
 406  CONTINUE
C
      PRIMA=.TRUE.
      TI=T
      DO 407 T=TI,TPARE
         EXECUTE CORIG
         IF (PRIMA) THENDO
            EXECUTE COPIA
            IF (QPRE) EXECUTE RFE45
            CALL LUSOLV(A,X,N,JPIV)
            PRIMA=.FALSE.
         ELSEDO
            IF (QPRE) EXECUTE RFX45
            CALL FWBWC(A,X,N,JPIV)
         ENDIF
         IF (QPRE) EXECUTE RAB45
         EXECUTE NEOCOT
         EXECUTE MONTE
 407  CONTINUE
      PRINT 410
 410  FORMAT(1H1)
      WRITE(6,409) R4,R5,C5,YMAX,SUPER
 409  FORMAT(5E14.4)
      IF(QPLOT) CALL PLOT(Y,3,TPARE,50)
      RETURN
C
C     ----------------------------------------------------------------------
C     BLOCOS REMOTOS.
C     ----------------------------------------------------------------------
C45
      REMOTE BLOCK MONTE
         IF(FATOR .EQ. 0.) THENDO
            CALL PICOS(T,E4)
         ELSEDO
            CALL PILHA(T,E4,FATOR)
         ENDIF
      ENDBLOCK
C50
      REMOTE BLOCK NEOCOP
         CALL REGIME(T,FE1 ,E1 )
         CALL REGIME(T,FE2 ,E2 )
         CALL REGIME(T,FE3 ,E3 )
         CALL REGIME(T,FE4 ,E4 )
         CALL REGIME(T,FI12,I12)
         CALL REGIME(T,FI21,I21)
         CALL REGIME(T,FI23,I23)
         CALL PROMV(E1 ,GAF,E1)
         CALL PROMV(AVE,GAF,E2)
         CALL PROMV(E2 ,GBF,E2)
         CALL PROMV(E3 ,GBF,E3)
         CALL PROMV(I21,HAF,I21)
         CALL PROMV(I12,HAF,I12)
         CALL PROMV(I23,HBF,I23)
         DO 501 K=1,3
            JA1(K,T)=AVE(K)+I21(K)
            JA2(K,T)=E1 (K)+I12(K)
            JB2(K,T)=E3 (K)
            JB3(K,T)=E2 (K)+I23(K)
 501     CONTINUE
         IF (QINTER) THENDO
            CALL REGIME(T,FI24,I24)
```

```
            CALL REGIME(T,FI26,I26)
            PRINT 603, T,I24,I26,E4,E2
         ENDIF
      ENDBLOCK
C55
      REMOTE BLOCK CORIG
         DO 551 K=1,3
            E1(K)=JA1(K,T-TVA(K))
            E2(K)=JA2(K,T-TVA(K))+JB2(K,T-TVB(K))
            E3(K)=JB3(K,T-TVB(K))
            E5(K)=IRC5(K)
            E6(K)=0.
 551     CONTINUE
         X(19)=X(20)=0.
         CALL REGIME(T,FES,ES)
         CALL PROMV(E1,S    ,E1 )
         CALL PROMV(ES,GRL1,ES )
         CALL SOMAV(E1,E1   ,ES )
         CALL SOMAV(E1,IRL1,E1 )
         CALL PROMV(E2,S    ,E2 )
         CALL SUBTV(E2,E2   ,IRL2)
         CALL PROMV(E3,S    ,E3 )
         CALL SUBTV(E4,IC4  ,IL4)
      ENDBLOCK
C60
      REMOTE BLOCK NEOCOT
C
C        CORRENTES INTERROMPIDAS.
C
         IF (QINTER) THENDO
            CALL PROMV(IT4,GL4,E4 )
            CALL SOMAV(IT4,IT4,IL4)
            CALL SUBTV(AVE,E6 ,E4 )
            CALL PROMV(I26,GR4,AVE)
            CALL PROMV(AVE,GC4,E4 )
            CALL SUBTV(AVE,AVE,IC4)
            CALL SOMAV(I24,IT4,AVE)
            CALL SUBTV(I24,I24,I26)
            PRINT 603, T,I24,I26,E4,E2
 603     FORMAT(/6X,'TEMPO=',I6,12X,'I24  =',3E12.3,6X,'I26  =',3E12.3
     +         //                30X,'E4   =',3E12.3,6X,'E2   =',3E12.3/)
         ENDIF
C
C        ATUALIZACAO DE VALORES HISTORICOS.
C
         CALL PROMV(AVE,GC4,E4 )
         CALL PROCV(AVE,2. ,AVE)
         CALL SUBTV(IC4,AVE,IC4)
C
         CALL PROMV(AVE,GL4,E4 )
         CALL PROCV(AVE,2. ,AVE)
         CALL SOMAV(IL4,AVE,IL4)
C
         CALL SUBTV(AVE ,ES  ,E1  )
         CALL PROMV(AVE ,URL1,AVE )
         CALL PROMV(IRL1,HRL1,IRL1)
         CALL SOMAV(IRL1,AVE ,IRL1)
C
         CALL PROMV(AVE ,URL2,E2  )
         CALL PROMV(IRL2,HRL2,IRL2)
         CALL SOMAV(IRL2,AVE ,IRL2)
C
         CALL PROMV(AVE ,URC5,E5  )
         CALL PROMV(IRC5,HRC5,IRC5)
         CALL SUBTV(IRC5,AVE ,IRC5)
C
         DO 604 K=1,3
            I12(K)=JA2(K,T-TVA(K))
            I21(K)=JA1(K,T-TVA(K))
```

```
            I23(K)=JB3(K,T-TVB(K))
            I32(K)=JB2(K,T-TVB(K))
 604     CONTINUE
C
         CALL PROMV(I12,HA,I12)
         CALL PROMV(I21,HA,I21)
         CALL PROMV(I23,HB,I23)
         CALL PROMV(I32,HB,I32)
C
         CALL PROMV(AVE,UGA,E2)
         CALL PROMV(E1 ,UGA,E1)
         CALL PROMV(E3 ,UGB,E3)
         CALL PROMV(E2 ,UGB,E2)
C
         DO 605 K=1,3
            JA1(K,T)=AVE(K)-I12(K)
            JA2(K,T)= E1(K)-I21(K)
            JB2(K,T)= E3(K)-I23(K)
            JB3(K,T)= E2(K)-I32(K)
 605     CONTINUE
         IF(T .LE. T261) CALL REGIME(T,FE4,E4)
      ENDBLOCK
C65
      REMOTE BLOCK COPIA
         DO 652 I=1,20
            DO 651 J=1,20
               A(I,J)=P(I,J)
 651        CONTINUE
 652     CONTINUE
      ENDBLOCK
C70
      REMOTE BLOCK RFE45
         CALL FECHE(12,15,X)
         CALL FECHE(11,14,X)
         CALL FECHE(10,13,X)
      ENDBLOCK
      REMOTE BLOCK RFX45
         CALL FECHX(12,15,X)
         CALL FECHX(11,14,X)
         CALL FECHX(10,13,X)
      ENDBLOCK
      REMOTE BLOCK RAB45
         CALL ABREX(10,13,X)
         CALL ABREX(11,14,X)
         CALL ABREX(12,15,X)
      ENDBLOCK
      END
C
C
C     -------------------------------------------------------------
C     PILHA  ACUMULA OS PONTOS A SEREM PLOTADOS.
C     -------------------------------------------------------------
      SUBROUTINE PILHA(T,E4,FATOR)
         INTEGER T
         LOGICAL QPLOT
         DIMENSION Y(4,400),E4(3)
         COMMON /PP/Y,YMAX,YMIN,QPLOT
         QPLOT=.TRUE.
         DO 40 I=1,3
            Y(I,T)=E4(I)*FATOR
 40      CONTINUE
      ENTRY PICOS(T,E4)
         Y(4,T)=AMAX1(ABS(E4(1)),ABS(E4(2)),ABS(E4(3)))
         YMAX=AMAX1(YMAX,Y(4,T))
      RETURN
      END
C
C
C     -------------------------------------------------------------
```

```
C      START ANALISA O SISTEMA EM REGIME PERMANENTE.
C      ------------------------------------------------------------------
       SUBROUTINE START(R4,R5,C5)
C
C10    DIMENSIONAMENTOS E ESPECIFICACOES.
C
       IMPLICIT   COMPLEX(E,I,X,Y,Z)
       COMPLEX    CMPLX,POLAR
       LOGICAL    QSTART,QINTER,QNOREL,QPRE
       DIMENSION  YP(7,7),EP(7)
       COMMON/PS/ ES,E1,E2,E3,E4,E5,E6,I12,I21,IL4,IC4,IRC5,IRL2,I23,I32,
     +            I24,I26,ES1 /EPS/QSTART,QINTER,QNOREL,QPRE
C
C20    INICIALIZACOES.
C
       DATA OMEGA,N/376.9911,6/
       ZRL1=      (2.09,18.24)
       ZRLA=      (8.65,47.43) ;          ZRLB=ZRLA
       YCA2=CMPLX(0.,3.23E-6*OMEGA/2.)
       YCB2=CMPLX(0.,.807E-6*OMEGA/2.)
       ZRL2=CMPLX(188.,165.7)
       YC4 =CMPLX(0.,9.66E-9*OMEGA    )
       ZRC5=CMPLX(R5,-1./(OMEGA*C5))
       ES=1.
       XL4=CMPLX(0.,14.5*OMEGA)
C30       FORMACAO DA MATRIZ ADMITANCIA E DO VETOR CORRENTE ORIGINAIS.
C
          DO 302 K=1,7
             DO 301 J=1,7
                YP(K,J)=0.
 301         CONTINUE
             EP(K)=0.
 302      CONTINUE
          EP(1)  =ES/ZRL1
          YP(1,1)=1./ZRL1+1./ZRLA+    YCA2
          YP(2,2)=1./ZRLA+    YCA2+1./ZRL2+YCB2+1./ZRLB
          YP(3,3)=1./ZRLB+    YCB2
          YP(4,4)=1./R4   +1./XL4+YC4
          YP(5,5)=1./ZRC5
          YP(6,6)=1./R4
          YP(1,2)=-1./ZRLA   ;            YP(2,1)=YP(1,2)
          YP(2,3)=-1./ZRLB  ;             YP(3,2)=YP(2,3)
          YP(4,6)=-1./R4  ;               YP(6,4)=YP(4,6)
C
C50       SIMULACAO DO CHAVEAMENTO, CALCULOS DAS TENSOES.
C
          CALL FECHY(YP,EP,N,2,6)
          IF (QPRE) CALL FECHY(YP,EP,N,4,5)
          CALL FECHY(YP,EP,N,2,4)
          CALL GAUSC(YP,EP,N)
          CALL ABRY (YP,EP,N,2,4)
          IF (QPRE) CALL ABRY (YP,EP,N,4,5)
          CALL ABRY (YP,EP,N,2,6)
          E1=EP(1) ; E2=EP(2) ; E3=EP(3)
          E4=EP(4) ; E5=EP(5) ; E6=EP(6)
          ES1=ES-E1
C
C60     CALCULOS DAS CORRENTES.
C
        I12 =(ES-E1)/ZRL1
        I21 =(E2-E1)/ZRLA+YCA2*E2
        IL4 = E4/XL4
        IC4 = YC4*E4
        IRC5= E5/ZRC5
        IRL2= E2/ZRL2
        I23 =(E2-E3)/ZRLB+YCB2*E2
        I32 =(E3-E2)/ZRLB+YCB2*E3
        I26=(E6-E4)/R4 ;  I24=IL4+IC4-I26+IRC5
C
```

```
C70   RELATORIO.
C
      IF(QNOREL) RETURN
      CALL GRARO(1,'IMPEDANCIAS E ADMITANCIAS DO SISTEMA          ')
      PRINT 701, ZRLA,YCA2,ZRL1,ZRLB,YCB2,ZRL2,XL4,YC4,ZRC5,R4
      CALL GRARO(1,'TENSOES E CORRENTES DE REGIME PERMANENTE      ')
      PRINT 700
  700 FORMAT(/12X,3(18X,'MODULO',6X,'  FASE'/))
      PRINT 702, POLAR(E1  ),POLAR(E2  ),POLAR(E3  ),
     +           POLAR(E4  ),POLAR(E5  ),POLAR(E6  )
      PRINT 703, POLAR(I12 ),POLAR(I23 ),POLAR(I24 ),
     +           POLAR(I21 ),POLAR(I32 ),POLAR(I26 ),
     +           POLAR(IL4 ),POLAR(IC4 ),POLAR(IRC5),POLAR(IRL2)
  701 FORMAT(/18X,'ZRLA =',2E12.3,6X,'YCA2 =',2E12.3,6X,'ZRL1 =',2E12.3/
     +     , /18X,'ZRLB =',2E12.3,6X,'YCB2 =',2E12.3,6X,'ZRL2 =',2E12.3/
     +       /18X,'XL4  =',2E12.3,6X,'YC4  =',2E12.3,6X,'ZRC5 =',2E12.3/
     +       /18X,'R4   =',2E12.3 /)
  702 FORMAT(/18X,'PE1  =',2E12.3,6X,'PE2  =',2E12.3,6X,'PE3  =',2E12.3/
     +       /18X,'PE4  =',2E12.3,6X,'PE5  =',2E12.3,6X,'PE6  =',2E12.3/
     +       /18X/)
  703 FORMAT(/18X,'PI12 =',2E12.3,6X,'PI23 =',2E12.3,6X,'PI24 =',2E12.3/
     +       /18X,'PI21 =',2E12.3,6X,'PI32 =',2E12.3,6X,'PI26 =',2E12.3/
     +       /18X,'PIL4 =',2E12.3,6X,'PIC4 =',2E12.3,6X,'PIRC5=',2E12.3/
     +       /18X,'PIRL2=',2E12.3 ///)
      QNOREL=.TRUE.
      RETURN
      END
C
C     ------------------------------------------------------------------
C     OPEMA   CRIA E OPERA COM MATRIZES QUADRADAS E VETORES DE DIMENSOES
C             TRES.
C     ------------------------------------------------------------------
      SUBROUTINE OPEMA(MA,MB,MC,VA,VB,VC,KS,KM,KP,KZ,K)
         REAL MA(3,3),MB(3,3),MC(3,3),MD(3,3),VA(3),VB(3),VC(3),VD(3),
     +        K,KP,KZ,KS,KM,KD,KN,NK
      ENTRY SOMAM(MA,MB,MC)
         DO 12 I=1,3
            DO 11 J=1,3
               MA(I,J)=MB(I,J)+MC(I,J)
   11       CONTINUE
   12    CONTINUE
      RETURN
      ENTRY SOMAV(VA,VB,VC)
         DO 13 I=1,3
            VA(I)=VB(I)+VC(I)
   13    CONTINUE
      RETURN
      ENTRY SUBTM(MA,MB,MC)
         DO 22 I=1,3
            DO 21 J=1,3
               MA(I,J)=MB(I,J)-MC(I,J)
   21       CONTINUE
   22    CONTINUE
      RETURN
      ENTRY SUBTV(VA,VB,VC)
         DO 23 I=1,3
            VA(I)=VB(I)-VC(I)
   23    CONTINUE
      RETURN
      ENTRY PROCM(MA,K,MB)
         DO 32 I=1,3
            DO 31 J=1,3
               MA(I,J)=K*MB(I,J)
   31       CONTINUE
   32    CONTINUE
      RETURN
      ENTRY PROCV(VA,K,VB)
         DO 33 I=1,3
            VA(I)=K*VB(I)
```

```
33       CONTINUE
      RETURN
      ENTRY PROMM(MA,MB,MC)
         DO 43 I=1,3
            DO 42 J=1,3
               MD(I,J)=0.
               DO 41 L=1,3
                  MD(I,J)=MD(I,J)+MB(I,L)*MC(L,J)
41             CONTINUE
42          CONTINUE
43       CONTINUE
         DO 45 I=1,3
            DO 44 J=1,3
               MA(I,J)=MD(I,J)
44          CONTINUE
45       CONTINUE
      RETURN
      ENTRY PROMV(VA,MA,VB)
         DO 47 I=1,3
            VD(I)=0.
            DO 46 J=1,3
               VD(I)=VD(I)+MA(I,J)*VB(J)
46          CONTINUE
47       CONTINUE
         DO 48 I=1,3
            VA(I)=VD(I)
48       CONTINUE
      RETURN
      ENTRY INVER(MA,MB)
         KD=MB(1,1)
         KN=MB(1,2)
         H =(KD+KN)*KD-2.*KN*KN
         DK=(KD+KN)/H
         NK=-KN/H
         DO 52 I=1,3
            DO 51 J=1,3
               MA(I,J)=NK
51          CONTINUE
            MA(I,I)=DK
52       CONTINUE
      RETURN
      ENTRY GERMM(MA,KP,KZ)
         DO 62 I=1,3
            DO 61 J=1,3
               MA(I,J)=0.
61          CONTINUE
62       CONTINUE
         MA(1,1)=KZ
         MA(2,2)=KP ;  MA(3,3)=KP
      RETURN
      ENTRY GERFM(MA,KP,KZ,K)
         KS=(KZ+2.*KP)/3.
         KM=(KZ-   KP)/3.
      ENTRY GERFF(MA,KS,KM,K)
         DO 64 I=1,3
            DO 63 J=1,3
               MA(I,J)=KM*K
63          CONTINUE
            MA(I,I)=KS*K
64       CONTINUE
      RETURN
      END
C
C
C     ------------------------------------------------------------------
C     FECHY   PARTICULARIZA O PROBLEMA A SER RESOLVIDO.
C     ------------------------------------------------------------------
      SUBROUTINE FECHY(A,X,N,I,J)
         COMPLEX  A(7,7),X(7)
```

```
      IF(I .GT. J) EXECUTE TROCA
      DO 101 K=1,N
      A(I,K)=A(I,K)+A(J,K)
 101  CONTINUE
      DO 102 K=1,N
      A(K,I)=A(K,I)+A(K,J)
 102  CONTINUE
      N1=N-1
      DO 103 L=J,N1
      M=L+1
      DO 105 K=1,N
      A(L,K)=A(M,K)
 105  CONTINUE
      DO 103 K=1,N
      A(K,L)=A(K,M)
 103  CONTINUE
      N=N-1
      RETURN
      ENTRY ABRY (A,X,N,I,J)
      IF(I .GT. J) EXECUTE TROCA
      N=N+1 ;           K=N
      WHILE (K .GT. J) DO
         X(K)=X(K-1)
         K=K-1
      ENDWHILE
      X(J)=X(I)
      RETURN
      REMOTE BLOCK TROCA
         NCOP=I
         I=J
         J=NCOP
      ENDBLOCK
      END
C
C
C     ------------------------------------------------------------------
C     FECHE   SIMULA O FECHAMENTO DE UM POLO DO DISJUNTOR.
C     ------------------------------------------------------------------
      SUBROUTINE FECHE(I,J,X)
      DIMENSION A(20,20),X(20)
      COMMON    /PF/A,N
      IF(I .GT. J) EXECUTE TROCA
      DO 101 K=1,N
      A(I,K)=A(I,K)+A(J,K)
 101  CONTINUE
      DO 102 K=1,N
      A(K,I)=A(K,I)+A(K,J)
 102  CONTINUE
      N1=N-1
      DO 103 L=J,N1
      M=L+1
      DO 105 K=1,N
      A(L,K)=A(M,K)
 105  CONTINUE
      DO 103 K=1,N
      A(K,L)=A(K,M)
 103  CONTINUE
      ENTRY FECHX(I,J,X)
      IF(I .GT. J) EXECUTE TROCA
      X(I)=X(I)+X(J)
      N=N-1
      DO 20 K=J,N
         X(K)=X(K+1)
 20   CONTINUE
      RETURN
      ENTRY ABREX(I,J,X)
      IF(I .GT. J) EXECUTE TROCA
      N=N+1 ;           K=N
      WHILE (K .GT. J) DO
```

```
            X(K)=X(K-1)
            K=K-1
         ENDWHILE
         X(J)=X(I)
         RETURN
         REMOTE BLOCK TROCA
            NCOP=I
            I=J
            J=NCOP
         ENDBLOCK
         END
C
C
C        ----------------------------------------------------------------
C        PLOT
C        ----------------------------------------------------------------
         SUBROUTINE PLOT (Y,M,NF,NS)
         DIMENSION Y(4, NF),LINE(101),L(11),JL(5)
         DATA JL(1),JL(2),JL(3),JL(4),JL(5)/1HA,1HB,1HC,1HD,1HE/
         DATA JN,JP,JI,JBLANK,JZ/1H-,1H+,1HI,1H ,1H$/
         WRITE(6,300)
 300     FORMAT(/////)
         DO 99 I=1,101
         LINE(I)=JBLANK
99       CONTINUE
         N=0
C-----PRINT ORDINATE SCALE
         DO 101 I=1,11
         L(I)=10*I-110+NS
101      CONTINUE
         WRITE(6,105) L
105      FORMAT (3X,11(I4,6X))
         GO TO 115
110      IF (N/10-(N-1)/10) 125,125,115
C
115      ND=0
         DO 120 I=1,10
         ND=ND+1
         LINE(ND)=JP
         DO 120 J=1,9
         ND=ND+1
120      LINE(ND)=JN
         LINE(101)=JP
         IF(N) 135,121,135
121      WRITE(6,170) N,LINE
         GO TO 185
C
C-----CONSTRUCT 1 LINE OF ABSCISSA GRAPH LINES
125      DO 130 I=1,101,10
         LINE(I)=JI
130      CONTINUE
C
C-----CHANGE  NUMERICAL DATA TO LETTERS
135      DO 160 I=1,M
         XNS=NS
         JA=Y(I,N)+101.49999-XNS
         IF(JA-101) 140,155,145
140      IF (JA) 150,150,155
145      LINE(101)=JZ
         GO TO 160
150      LINE(1)=JZ
         GO TO 160
155      LINE(JA)=JL(I)
160      CONTINUE
C
C-----PRINT LINE OF DATA
         IF (N/10-(N-1)/10) 175,175,165
165      WRITE(6,170) N,LINE,Y(4,N)
170      FORMAT (1X,I4,101A1,1PG11.3)
```

```
      GO TO 185
175   WRITE(6,180) LINE,Y(4,N)
180   FORMAT (5X,101A1,1PG11.3)
C
C-----SET LINE VARIABLES TO ZERO
185   DO 190 I=1,101
      LINE(I)=JBLANK
190   CONTINUE
195   N=N+1
      IF (N-NF) 110,110,200
 200  WRITE(6,300)    ;  RETURN
      END
C
C
C
C     ------------------------------------------------------------------
C     GAUSC    RESOLVE EQUACOES ALGEBRICAS LINEARES SIMULTANEAS COM  COE-
C              FICIENTES COMPLEXOS.
C     ------------------------------------------------------------------
      SUBROUTINE GAUSC(A,B,N)
      COMPLEX A(7,7),B(7),SUM,PIV
      DO 5 I=1,N
      I1=I+1
      IF(CABS(A(I,I)) .LE. 1.E-10) GOTO 1
      GOTO 15
 1    CONTINUE
      IF(I .EQ.N) GOTO 10
      DO 14 J=I1,N
      IF(CABS(A(J,I)) .LE. 1.E-10) GOTO 14
      IPIV=J
      GOTO 16
 14   CONTINUE
      GOTO 10
 16   DO 2 K=1,N
      PIV=A(IPIV,K)
      A(IPIV,K)=A(I,K)
 2    A(I,K)=PIV
      PIV=B(IPIV)
      B(IPIV)=B(I)
      B(I)=PIV
 15   IF(I .EQ. N) GOTO 3
      DO 8 JI=I1,N
 8    A(I,JI)=A(I,JI)/A(I,I)
      B(I)=B(I)/A(I,I)
      DO 5 J=I1,N
      DO 4 K=I1,N
 4    A(J,K)=A(J,K)-(A(J,I)*A(I,K))
 5    B(J)=B(J)-(B(I)*A(J,I))
 3    B(N)=B(N)/A(N,N)
      DO 6 K=2,N
      I=N-K+1
      L=I+1
      SUM=0.
      DO 7 J=L,N
 7    SUM=SUM+A(I,J)*B(J)
 6    B(I)=B(I)-SUM
      RETURN
 10   WRITE(6,9)
 9    FORMAT(' ***** EQUATIONS ARE LINEARLY DEPENDENT *****' )
      STOP
      END
C
C     ------------------------------------------------------------------
C     LUSOLV
C     ------------------------------------------------------------------
      SUBROUTINE LUSOLV(A,BC,N,JPIV)
      DIMENSION  A(20,20),BC(20),JPIV(20)
      DO 4 I=1,N
      JPIV(I)=I
```

```
      I1=I+1
      IF( ABS(A(I,I)).LE.1.E-50) GO TO 1
      GO TO 15
    1 CONTINUE
      DO 14 J=I1,N
      IF(I.EQ.N) GO TO 20
      IF( ABS(A(J,I)).LE.1.E-50) GO TO 14
      JPIV(I)=J
      GO TO 16
   14 CONTINUE
      GO TO 20
   16 DO 2 K=1,N
      IPIV=JPIV(I)
      PIV=A(IPIV,K)
      A(IPIV,K)=A(I,K)
      A(I,K)=PIV
    2 CONTINUE
   15 IF(I.EQ.N) GO TO 3
      DO 8 JI=I1,N
    8 A(I,JI)=A(I,JI)/A(I,I)
      DO 4 J=I1,N
      DO 4 K=I1,N
    4 A(J,K)=A(J,K)-(A(J,I)*A(I,K))
    3 CONTINUE
      ENTRY FWBWC(A,BC,N,JPIV)
      DO 61 I=1,N
      IPIV=JPIV(I)
      IF(IPIV.LE.I) GO TO 61
      J=I
      PIVA=BC(I)
   62 PIV=BC(IPIV)
      BC(IPIV)=PIVA
      JPIV(J)=-IPIV
      J=IPIV
      IPIV=JPIV(J)
      PIVA=PIV
      IF(IPIV.GT.0) GO TO 62
   61 CONTINUE
      DO 63 I=1,N
   63 JPIV(I)=IABS(JPIV(I))
C     FORWARD SUBSTITUTION
      DO 31 K=1,N
      SUM=0.0
      IF(K.EQ.1) GO TO 41
      MM=K-1
      DO 51 J=1,MM
   51 SUM=SUM+A(K,J)*BC(J)
   41 BC(K)=(1./A(K,K))*(BC(K)-SUM)
   31 CONTINUE
C     BACKWARD SUBSTITUTION
      DO 91 LL=1,N
      K=(N+1)-LL
      SUM=0.0
      IF(K.EQ.N) GO TO 81
      KK=K+1
      DO 71 J=KK,N
   71 SUM=SUM+A(K,J)*BC(J)
   81 BC(K)=BC(K)-SUM
   91 CONTINUE
      GO TO 30
   20 PRINT 21
   21 FORMAT("EQUATIONS ARE LINEARLY DEPENDENT")
      STOP
   30 CONTINUE
      RETURN
      END
C
C
C     ------------------------------------------------------------
```

```
C
C
C     -----------------------------------------------------------------
C     SUBROTINAS AUXILIARES PARA CONFECCAO DE RELATORIOS.
C     -----------------------------------------------------------------
      SUBROUTINE GRAFIA(WA,MA,VA,FA,WB,MB,VB,FB,WC,MC,VC,FC)
         CHARACTER*6 WA,WB,WC
         REAL        MA(3,3),MB(3,3),MC(3,3),VA(3),VB(3),VC(3)
         COMPLEX     FA,FB,FC
      ENTRY GRAMA(WA,MA,WB,MB,WC,MC)
         WRITE(6,50) WA,WB,WC,((MA(I,J),J=1,3),(MB(I,J),J=1,3),
     +                          (MC(I,J),J=1,3),I=1,3)
 50      FORMAT(1H0,T3,A6,T45,A6,T88,A6/3(/1P3E12.3,2(6X,1P3E12.3))///)
         RETURN
      ENTRY GRAVE(WA,VA,WB,VB,WC,VC)
         WRITE(6,60) WA,WB,WC,VA,VB,VC
 60      FORMAT(1H0,T3,A6,T45,A6,T88,A6/ 1P3E12.3,2(6X,1P3E12.3)    )
         RETURN
      ENTRY GRACO(WA,FA,WB,FB,WC,FC)
         WRITE(6,70) WA,FA,WB,FB,WC,FC
 70      FORMAT(1H0,6X,A6,1P2E12.3,2(12X,A6,1P2E12.3))
         RETURN
      END
      SUBROUTINE GRARO(NF,ROTULO)
         CHARACTER*1 LINE(119)/119 *1H-/
         CHARACTER*47 ROTULO
         IF(NF-1) 10,20,30
 10         PRINT 14,ROTULO
 14         FORMAT(////1X,A47/)
 20      CONTINUE
            PRINT 24, LINE,ROTULO,LINE
 24         FORMAT(////1X,119A1/1X,A47/1X,119A1//)
 30      RETURN
      END
      SUBROUTINE RELAT(A,N)
         DIMENSION A(20,20)
         WRITE(6,605) ((I,J,A(I,J),J=I,N),I=1,N)
         DO 602 I=1,N
            DO 601 J=1,N
               IF(A(I,J) .NE. A(J,I))  WRITE(6,606) I,J
               IF(ABS(A(I,J)) .GE. 1.) WRITE(6,606) I,J
 601        CONTINUE
            IF(A(I,I) .LE. 0.) WRITE(6,606) I,I
 602     CONTINUE
         WRITE(6,607)
 605     FORMAT( 5(I8,I4,F12.7))
 606     FORMAT( ///' *** ADVERTENCIA *** O ELEMENTO (',I2,',',I2,') DE'
     +           ,'STA MATRIZ TEM VALOR NAO ESPERADO' //)
 607     FORMAT( ///// )
         RETURN
      END
$ENTRY
```