UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

CONSIDERAÇÕES SOBRE O CÁLCULO DE REGIMES ESTACIONÁRIOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

SAVU CRIVAT SAVULESCU
CAROLINO AUGUSTO CEPEDA

SÃO CARLOS
2021

RJ/GPO/09

CARLOS GOLDENBERG

CONSIDERAÇÕES SOBRE O CALCULO DE REGIMES ESTACIONÁRIOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

SAVU CRIVAT SAVULESCU CAROLINO AUGUSTO CEPEDA

Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
SÃO CARLOS, S.P.

INTRODUÇÃO

A contínua expansão e sofisticação dos sistemas elétricos de potência, tanto em nível de operação como em projeto reflete - se na evolução dos métodos e das ferramentas de cálculos. É difícil afirmar-se que o desenvolvimento dos meios de computação foi comandado pelas dimensões e dificuldades dos problemas de engenharia; a implicação inversa tampouco pode ser demonstrada. O fato é que nas duas últimas décadas os projetistas exigiram, quase invariavelmente, computadores gigantes como única solução em situações aparentemente sem saída.

Surgem então as perguntas:

- permite a implementação de sistemas computacionais de grande porte resolver, em condições razoavelmente econômicas, todos os problemas de uma empresa de energia elétrica?

Class. APOSTILA
Cutt. 5269c
Tombo AC165536

- a rapidíssima evolução da "moda computacional" deve ser acompanhada em detrimento da capacidade de raciocinio do engenheiro?

que, em síntese, condunzem a:

-qual seria a melhor política tecnológica: adaptar os meios computacionais às necessidades de cálculo- às vezes aparentes ou, então, estudar profundamente os modelos físicos e definir *algoritmos orientados sobre os problemas*, de tal forma que possam ser processados nos sistemas de computação já existentes?

Vários autores já dedicaram esforços no sentido de responder esta última questão - ver bibliografia em (1) - elaborando métodos especiais que levam em consideração caracteristicas fundamentais dos sistemas elétricos de potência. O nosso objetivo é ilustrar essa posição apresentando dois algoritmos de cálculos dos fluxos de potência baseados em propriedades específicas das redes elétricas.

1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA DE CÁLCULO DOS FLUXOS DE POTÊNCIA EM REGIME ESTACIONÁRIO

O cálculo dos fluxos de potência consiste em determinar, inicialmente, as tensões (módulo e ângulo) nos nós e, posteriormente, os fluxos de potência ativa e reativa nas linhas de um sistema eletroenergético.

Um nó é caracterizado por quatro grandezas associadas, a saber:

- módulo da tensão nodal;
- ângulo (fase) da tensão nodal;
- potência ativa injetada;

- potência reativa injetada.

A seguinte classificação para os nós pode ser feita:

a) *nós de carga:* estão especificadas as potências ativa e reativa injetadas;

b) *nós de geração:* estão especificados a potência ativa injetada e o módulo da tensão nodal;

c) *nó de balanço:* está especificada a tensão nodal complexa.

Observações:

- a potência reativa injetada (módulo da tensão nodal) nos nós de geração (carga) são variáveis em geral controladas para que se verifiquem restrições fisicamente impostas. Quando restrições (limites) não podem ser mantidas, uma *redefinição nodal* deve ser feita. Por exemplo, se as restrições de potência reativa injetada num nó de geração forem violadas, fixa-se então a injeção de reativo no valor limite ultrapassado (Q_{max} ou Q_{min}) e redefine-se o nó como de carga. Este procedimento está largamente presente *durante* o processo de cálculo dos fluxos de potência;

- o nó de balanço fornecerá as potências ativa e reativa adicionais para suprir as perdas de transmissão, as quais são desconhecidas (função das tensões nodais) até a solução final. A seleção deste nó deve ser feita de forma muito conveniente(1) e servirá como referência para os ângulos das tensões nodais. A tensão nodal do nó de balanço poderá ser adotada como estimativa inicial para as tensões dos nós de carga, ao invés da "flat voltage" $1\underline{|0}$ (pu). O ângulo desta tensão será arbitrariamente escolhido como zero. Matematicamente, o nó de balanço pode ser substituido por apenas um nó de referência, o que implica em passar do domínio da álgebra para o da programação não-linear.

Uma discussão completa sobre este assunto encontra-se em (2). É dada no Anexo 2, uma outra justificativa da necessidade de "parametrizar" o módulo de uma e uma só tensão nodal.

2. EQUACIONAMENTO BÁSICO PARA O CÁLCULO DOS FLUXOS DE POTÊNCIA.

Seja o regime estacionário descrito pelas equações nodais (3):

$$I = Y\,V \qquad (1.a)$$

$$\underline{S}_i = P_i + j\,Q_i = \underline{V}_i\,\underline{I}_i^{*} \quad ; \; i = 1, \ldots, N \qquad (1.b)$$

ou seja, N equações complexas, cada uma de grau N (sendo N o número total de nós, o terra excluido). A resolvibilidade do sistema (1) será 2^N, isto é, haverá 2^N soluções complexas; fisicamente, uma só interessa e será obtida através de um processo iterativo. O método consiste em atribuir valores às grandezas incógnitas (geralmente as tensões nodais complexas) e verificar as outras condições nodais. O critério de convergência do processo iterativo pode ser a comparação entre os valores de um estágio com os da iteração anterior; outro critério pode ser a comparação das variáveis nodais calculadas com os valores especificados.

As equações (1) supoem a rede descrita pela matriz de admitâncias nodais. Outros sistemas referenciais como por exemplo, a matriz das impedâncias nodais, podem ser adotados.

Inumeros métodos foram propostos e testados; a bibliografia sobre o assunto é extensa (1). Porém, duas familias de algoritmo destacam-se: métodos do tipo Gauss- Seidel e métodos do tipo Newton-Raphson, baseados na *transformação topológica dos nós'* (4), e utilizando a matriz de admitâncias nodais.

Não se pretende aqui transcrever os métodos acima nem tam

pouco explorar novas teorias a respeito, mas sim, apenas mostrar artifícios simplificadores que conduzem à economia de tempo de processo e/ou de memória, dentro de requerimentos básicos de precisão convenientemente definidos.

3. O MÉTODO DOS DOIS NÍVEIS DE ELIMINAÇÃO

Uma forma de aproveitar as particularidades físicas e topológicas do sistema é apresentada pelos autores da referência[5] Propõem estes autores, no caso dos sistemas de distribuição, relacionar a descrição dos nós de carga com as características dos consumidores, resultando simplificações algébricas que implicam na redução do número de variáveis e de equações a serem processadas. As propriedades da matriz reduzida refletem-se na rápidez do cálculo iterativo.

3.1. Apresentação formal

Seja a equação matricial (1.a) com a partição,

$$\begin{bmatrix} IG \\ IT \\ ICN \\ ICL \\ ICA \end{bmatrix} = Y \begin{bmatrix} VG \\ VT \\ VCN \\ VCL \\ VCA \end{bmatrix} \qquad (2)$$

onde cada parte do vetor I (V) está associada a uma classe de barramentos, conforme segue,

1. IG, VG - nós geradores, nó conjunto $G = \{1, 2, \ldots, G\}$;
2. IT, VT - nós de transformadores com derivações variáveis sob carga, no conjunto $T = \{G + 1, \ldots, N_T\}$;
3. ICN, VCN - nós de carga importantes, onde são especificadas as potências ativa e reativa consumidas

no conjunto $C_N = \{N_T + 1, \ldots, N_{CN}\}$;

4. ICL, VCL - nós de carga "quase lineares": este grupo contém os nós onde a carga é aproximadamente linear, isto é, onde a carga é tratada, numa primeira aproximação, como sendo um nó de admitância (impedância) fixa. Prevê-se que 50% dos nós encontram-se nesta categoria. Este conjunto será por $C_L = \{N_{CN} + 1, \ldots, N_{CL}\}$;

5. ICA, VCA - nós de carga lineares, ou que podem ser representados por admitâncias (impedâncias) fixas, é o conjunto $C_A = \{N_{CL} + 1, \ldots, N\}$.

3.2 Primeiro nível de eliminação

Admitindo que o i-ésimo elemento do vetor I corresponda a um barramento da classe 5, a equação (1.a) pode ser escrita para este elemento como,

$$\underline{ICA}_i = \sum_{j \in i} \underline{Y}_{ij} \cdot \underline{VCA}_j = \underline{Y}_{ii} \cdot \underline{VCA}_i + \sum_{j \notin i} \underline{Y}_{ij} \cdot \underline{VCA}_j \qquad (3)$$

Além disto, indicando por $\underline{YCA}_i$ a admitância fixa deste barramento (carga), a seguinte relação deve ser verificada:

$$\underline{ICA}_i = \underline{YCA}_i \cdot \underline{VCA}_i \qquad (4)$$

Substituindo (4) em (3) resulta

$$0 = (\underline{Y}_{ii} - \underline{YCA}_i)\, \underline{VCA}_i + \sum_{j \notin i} \underline{Y}_{ij} \cdot \underline{VCA}_j \qquad (5)$$

Desta forma, as equações correspondentes aos barramentos da classe 5 podem ser eliminadas e a matriz Y reduzida pela formula

$$\underline{YR}_{ij} = \underline{Y}_{ij} - \frac{\underline{Y}_{ik}\ \underline{Y}_{kj}}{(\underline{Y}_{kk} - \underline{YCA}_{k})} \quad . \tag{6}$$

A equação (2) ficará então:

$$\begin{bmatrix} IG \\ IT \\ ICN \\ ICL \end{bmatrix} = YR \begin{bmatrix} VG \\ VT \\ VCN \\ VCL \end{bmatrix} \quad . \tag{7}$$

A equação (7) é EQUIVALENTE à equação (2) que somente será utilizada quando se pretende determinar as variáveis do conjunto C_A.

3.3. Segundo Nível de Eliminação

Partindo da equação (7), repete-se o desenvolvimento aplicado ao Primeiro Nível de Eliminação, apenas reescrevendo a equação (4) com admitância:

$$\underline{YCL}_i^k = \frac{PCL_i - jQCL_i}{(UCL_i^k)^2} \quad , \tag{8}$$

onde UCL_i^k é o módulo de VCL_i no passo k do processo iterativo.

A equação (7) ficará então

$$\begin{bmatrix} IG \\ IT \\ ICN \end{bmatrix} = YRR \begin{bmatrix} VG \\ VT \\ VCN \end{bmatrix} \tag{9}$$

Os nós "quase lineares" foram assim definidos para diferenciá-los dos lineares de C_A. A seleção destes nós depende da configuração do sistema e é feita intuitivamente na base do bom senso e da experiência prática. Por exemplo, nós onde o consumo de

potência é relativamente baixo, são tratdos como lineares, sem trazer alterações de efeitos maiores nos fluxos de potência. Por outro lado, grandes cargas concentradas ou localizadas em posi - ções com grande influência na estrutura dos fluxos de carga não podem ser "linearizadas".

O número de equações no sistema matricial (9) pode chegar a ser 50% menor que o original (2) e a solução pode ser obtida ' utilizando-se técnicas convencionais de computação de fluxos de potência

3.4 Considerações finais

Um trecho do processo iterativo global é dado na Fig. 1

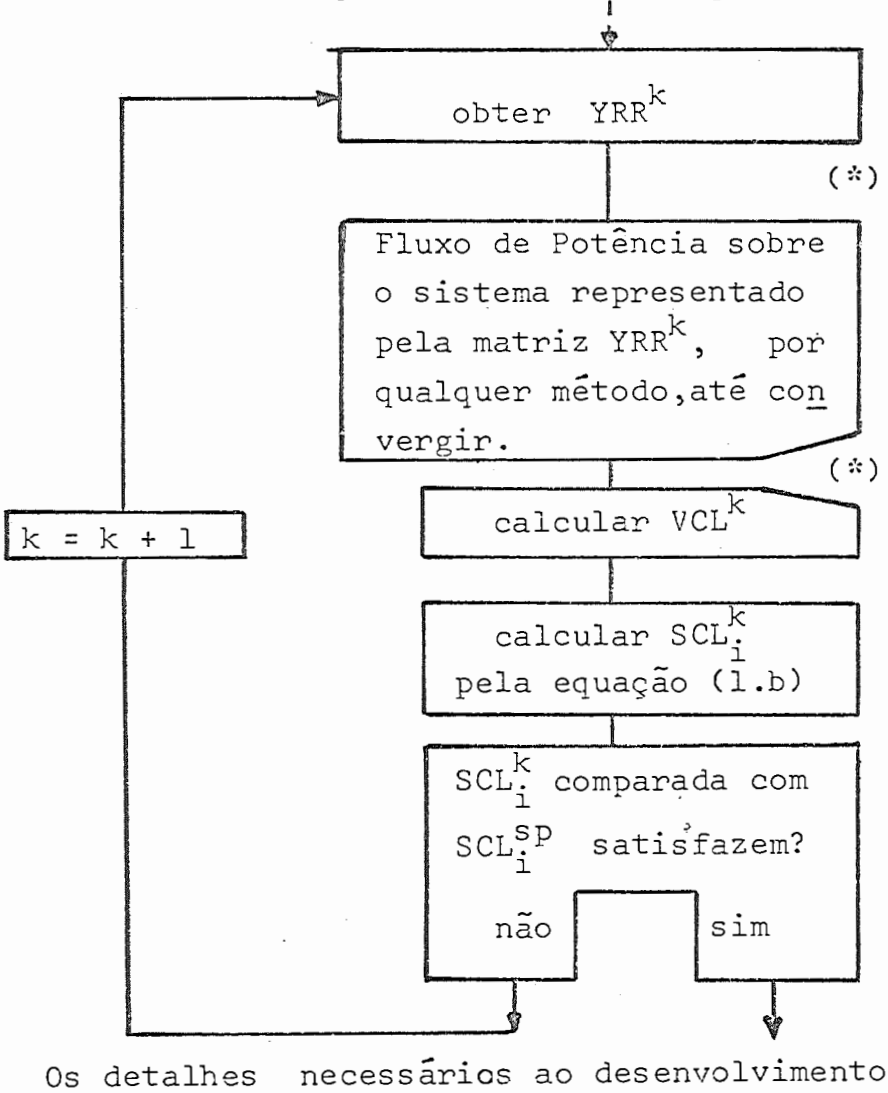


FIG. 1

(*) Os detalhes necessários ao desenvolvimento destes blocos podem ser obtidos em (5).

Aparentemente, o processo acima é demorado; a prática mostrou, porèm, que uma ou duas iterações são suficientes.

O tratamento dos transformadores com derivações variáveis pode ser o mesmo dos métodos convencionais. Os autores da referência (5) sugerem uma alternativa, aqui apresentada no Anexo 1.

4. ALGUNS ASPECTOS DOS MÉTODOS DESACOPLADOS

4.1. O Conceito de Desacoplamento

Na Análise dos Fluxos de Potência uma diferenciação entre os métodos, relacionados à precisão da solução obtida, deve necessariamente ser feita. Nesta diferenciação, *métodos exatos* são aqueles que levam em conta os fluxos de potência ativa e reativa para obter a solução, enquanto *métodos aproximados* o fazem, através de representações parciais e possíveis eficiências computacionais, ignorando equações reais ou reativas. Modelos aproximados são normalmente feitos para aplicações particulares, não tendo assim a generalidade inerente aos métodos exatos. Como exemplo de técnicas simplificadas podem ser citadas:

- o modelo em "corrente contínua", uma formulação P - δ, para planejamento de transmissão e análise de confiabilidade do sistema;

- o modelo para estudo da sensibilidade da rede em face a variações de tensão (formulação Q-U).

Entre estas duas classes, por muito tempo existiu uma lacuna, ou seja, a falta de métodos que combinassem a generalidade e precisão dos exatos à simplicidade e eficiência computacional dos modelos aproximados. Esta lacuna só foi devidamente preenchida

após o desenvolvimento dos métodos baseados no *conceito de desacoplamento*, isto é, uma maior sensibilidade nos relacionamentos' funcionais P - δ e Q - U .

4.2. Apresentação Matemática do Desacopalmento

O estabelecimento matemático deste conceito é simples e será dado a seguir (8) .

Nomenclatura adicional.

$\underline{Z}_{ij} = R_{ij} + j\ X_{ij}$ - impedância séria da linha entre as barras i e j

$\underline{Z}_{ii} = R_{ii} + j\ X_{ii}$ - impedância total entre a barra i e o terra.

Entre estas impedâncias e os elementos $\underline{Y}_{ij}$ e $\underline{Y}_{ii}$ da matriz de admitâncias nodais existem as relações:

$$\underline{Y}_{ij} = G_{ij} + j\ B_{ij} = -\ \underline{Z}^{*}_{ij} / Z^{2}_{ij} \qquad (10)$$

$$\underline{Y}_{ii} = G_{ii} + j\ B_{ii} = \sum_{j \varepsilon i} \underline{Z}^{*}_{ij} / Z^{2}_{ij} \qquad (11)$$

onde

$$Z^{2}_{ij} = R^{2}_{ij} + X^{2}_{ij} \qquad (12)$$

Com base nisto, as potências ativa e reativa injetadas numa barra i genérica, se escrevem como:

$$P_i = U_i^2\ R_{ii}/Z^2_{ii} + \sum_{j \varepsilon i} (sR_{ij} + tX_{ij})/Z^2_{ij} \qquad (13)$$

$$Q_i = U_i^2 X_{ii}/Z^2_{ii} + \sum_{j \varepsilon i} (sX_{ij} + tR_{ij})/Z^2_{ij} \qquad (14)$$

onde s e t são as relações funcionais

$$s\ (\ U_i,\ U_j,\ \delta_{ij}) = U_i^2 - U_i\ U_j \cos \delta_{ij} \qquad (15)$$

USP Biblioteca S. CARLOS

$$t\,(U_i,\ U_j,\ \delta_{ij}) = U_i\ U_j\ \text{sen}\ \delta_{ij} \qquad (16)$$

A *análise de sensibilidade* mostra como certas variáveis ' são afetadas quando outras variáveis sofrem pequenas modificações. Isto é feito pelas derivadas parciais das primeiras com relação ' às segundas.

As várias sensibilidades de s e t são:

$$\partial s/\partial U_i = 2\ U_i - U_j \cos \delta_{ij} \qquad (17)$$

$$\partial s/\partial U_j = -\ U_i \cos \delta_{ij} \qquad (18)$$

$$\partial s/\partial \delta_{ij} = U_i\ U_j\ \text{sen}\ \delta_{ij} \qquad (19)$$

$$\partial t/\partial U_i = U_j\ \text{sen}\ \delta_{ij} \qquad (20)$$

$$\partial t/\partial U_j = U_i\ \text{sen}\ \delta_{ij} \qquad (21)$$

$$\partial t/\partial \delta_{ij} = U_i\ U_j \cos \delta_{ij} \qquad (22)$$

Admitindo que as defasagens δ_{ij} sejam relativamente pequenas e os módulos das tensões nodais aproximadamente iguais a um ' (p.u.), as equações (17) - (19) mostram que a função s é mais sensível aos módulos que aos ângulos das tensões nodais, ou seja , ' $|\partial s/\partial U_i|$ e $|\partial s/\partial U_j|$ maiores que $|\partial s/\partial \delta_{ij}|$. Por outro lado, a função t é mais sensível aos ângulos das tensões nodais.

Além disto, para redes de 115 kV ou mais, a reatância X_{ij} é, usualmente, muito maior que a resistência R_{ij}.

Portanto, a sensibilidade da potência ativa (13) é domina da pelo segundo termo da somatória, enquanto que a da potência ' reativa (14) o é pelo primeiro termo. As equações de potência ' são assim desacopladas pelas suas respectivas sensibilidades, ficando definidas as dependências entre as variáveis P -δ e Q - U.

Fato muito importante neste estudo é a relação que tem o desacoplamento com as impedâncias sérias das linhas de transmissão, bem como com as condições de operação que tendem a manter os ângulos de defasagem δ_{ij} pequenos e os módulos das tensões nodais próximos de um (p.u.).

Em redes de baixa tensão, o desacoplamento pode necessitar aperfeiçoamentos para permitir sua aplicação. Isto ocorre quando existem R_{ij} maiores que X_{ij} em linhas do sistema. Frente a esta situação, o comprometimento das características de convergência dos métodos desacoplados é de tal ordem que tem obrigado muitos analistas a não utilizá-los e, consequentemente, perder as vantagens deles inerentes (economia de tempo e de memória computacionais, entre outras).

Procurando minorar os efeitos destes aspectos negativos, duas técnicas serão apresentadas. Elas são fundamentadas apenas na experiência, são pouco difundidas e não aparecem na literatura usual.

4.3. Artíficios para aprimorar as características de convergência de Métodos Desacoplados

Seja a Fig. 2, onde está representado o circuito simétrico de uma linha de transmissão de energia elétrica, com relação R/X desfavorável à aplicações de métodos desacoplados na Análise dos Fluxos de Potência.

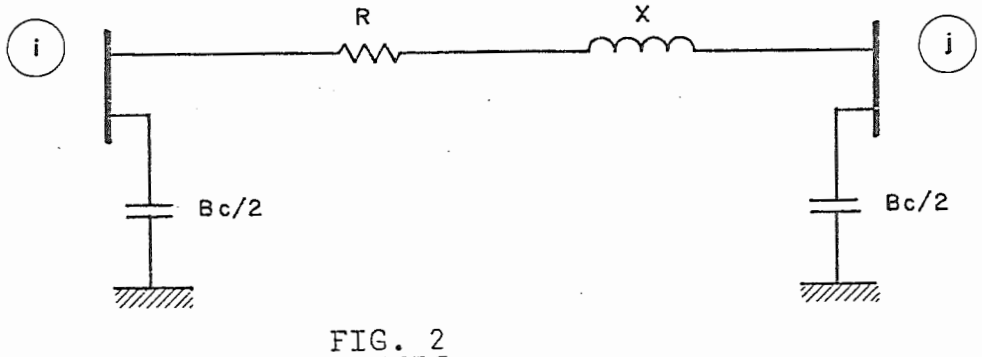


FIG. 2

Verificados problemas de convergência, em geral eles estarão relacionados com os erros das potências injetadas nos extremos desta linha ou nas barras próximas.

4.3.1. Técnica da "Desaceleração Angular" - TDA.

Dividir as correções angulares $\Delta\delta_i$ *e* $\Delta\delta_j$ *por um fator* k, *antes de aplicá-las às fases das tensões nodais correspondentes, durante o processo iterativo.*

A dependência do fator k com as características da rede não pode ser formalizada. Desta maneira, a determinação de um *bom valor* para a desaceleração angular é feita experimentalmente.

4.3.2. Técnica da "Compensação Reativa" - TCR.

Substituir o circuito da Fig. 2 pelo da Fig. 3 onde a reatância indutiva da linha foi "compensada" para tornar a relação R/X próxima de 1/3.

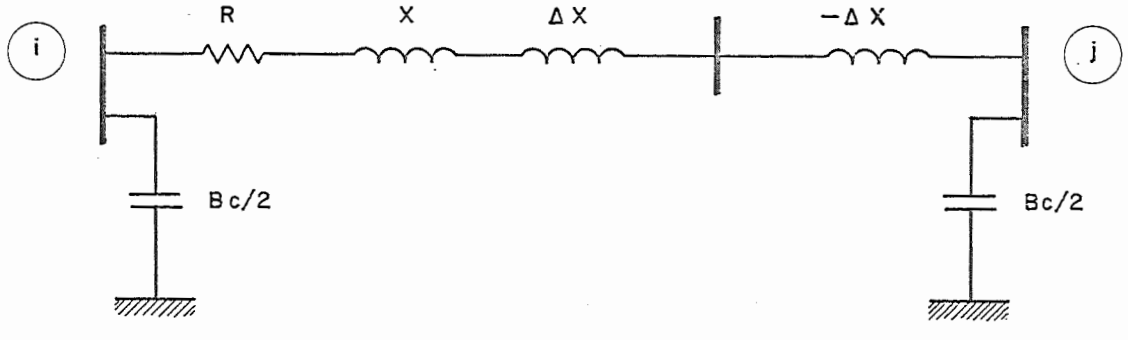


FIG. 3

4.3.3. Escolha do Processo Iterativo

Para demonstrar os efeitos destas técnicas, as redes das Fig. 4 e Fig. 5 foram utilizadas (1).

(1) Cópia dos dados poderá ser obtida com os autores.

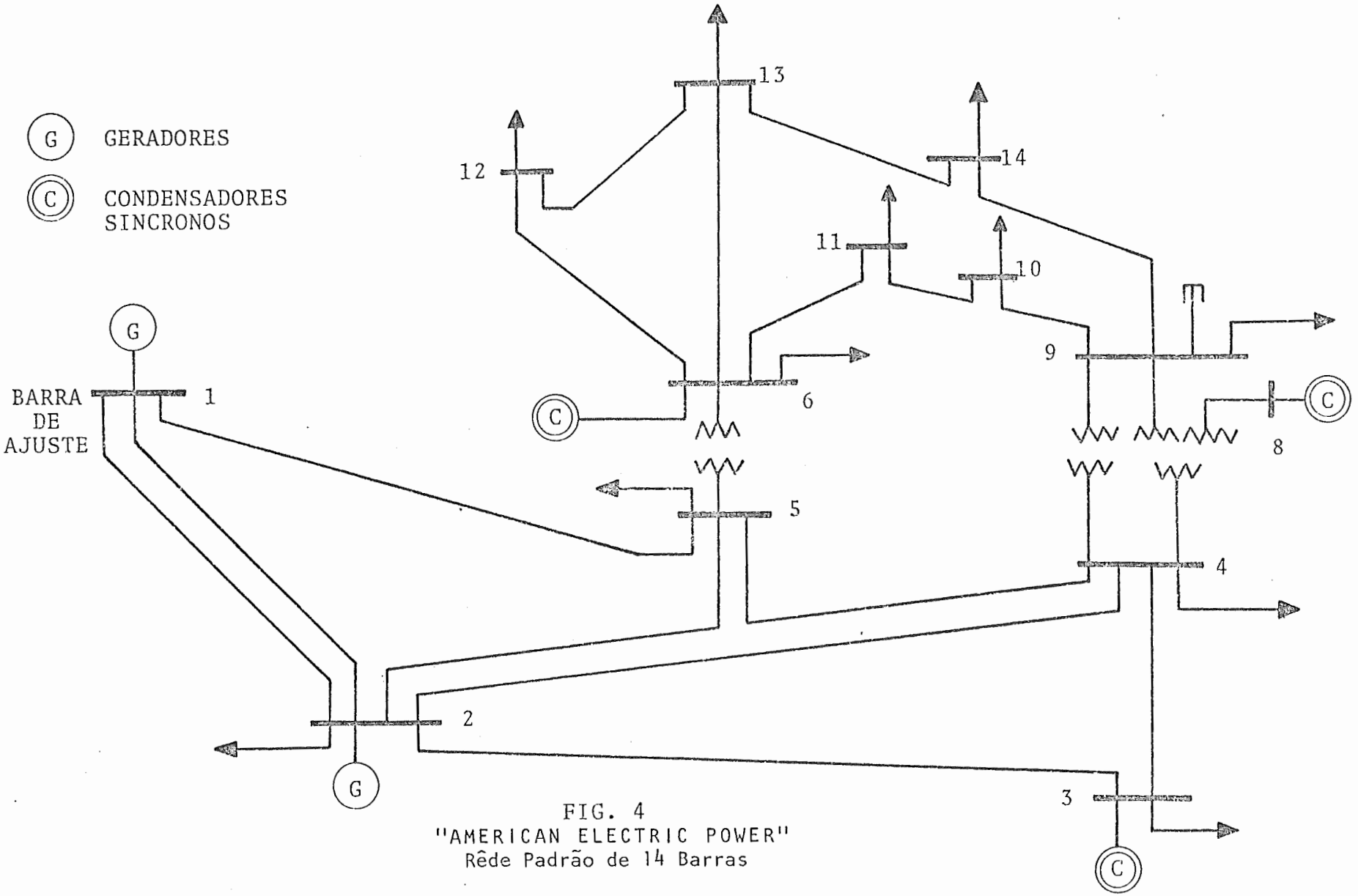


FIG. 4
"AMERICAN ELECTRIC POWER"
Rêde Padrão de 14 Barras

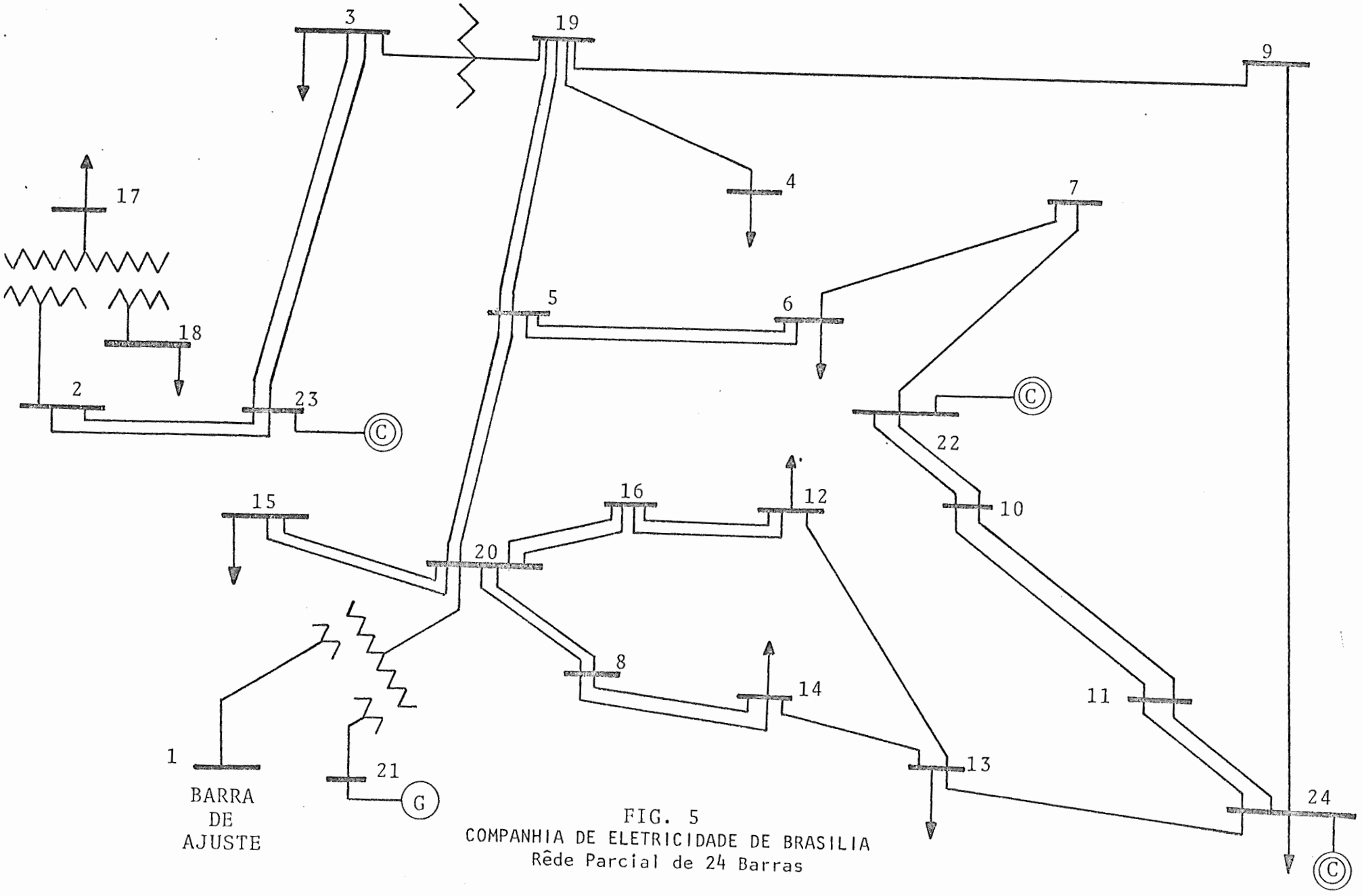
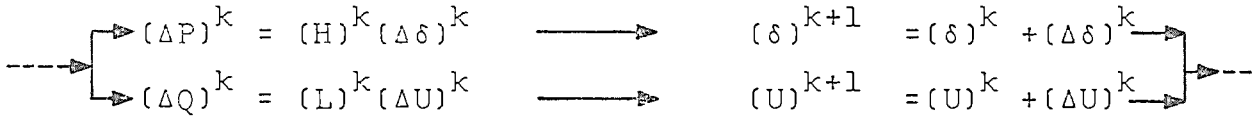


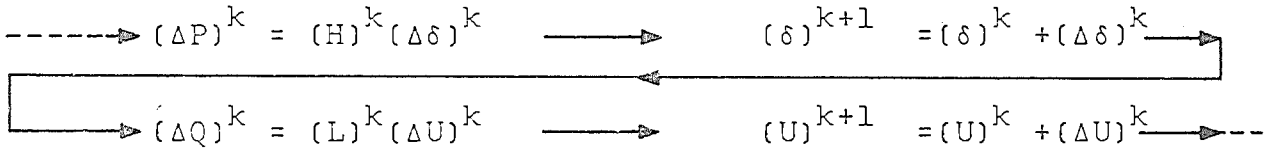
FIG. 5
COMPANHIA DE ELETRICIDADE DE BRASILIA
Rêde Parcial de 24 Barras

A escolha do método recaiu sobre o de Newton-Raphson Desacoplado (NRD) (9), com os seguintes esquemas iterativos para a resolução dos sistemas de equações linearizados.

Bloco Substituições Simultâneas (BSSI)



Bloco Substituições Sucessivas (BSSU)



4.4. Apresentação dos Resultados

No desenvolvimento deste estudo de convergência as seguintes questões foram pesquisadas.

1) Qual a melhor forma de aplicar a TDA?

2) Qual a melhor forma de aplicar a TCR?

3) Qual entre as duas técnicas é mais adequada?

4) Qual o melhor esquema iterativo para corrigir as tensões nodais?

Os resultados obtidos serão apresentados sinteticamente, mas de forma a possibilitar conclusões imediatas.

4.4.1. Testes com a Rede CEB/24

NA ITERAÇÃO	SOMENTE AS BARRAS	TEM ERRO MAIOR QUE	NA POTÊNCIA INJETADA
2	20	0.01	REATIVA
2	21	0.01	REATIVA
MAIOR	ERRO	EM VALOR	ABSOLUTO
ITERAÇÃO	BARRA	ERRO	POTÊNCIA
3	14	0,15 E-4	ATIVA
3	8	0,52 E-4	REATIVA

TAB.1- Rede CEB/24. Caracterização da convergência pelo Método de Newton Raphson formal, ou seja, matriz jacobiana completa e reavaliada em todas as iterações.

ITERAÇÃO	ERROS VERIFICADOS			
	BARRA 10		BARRA 11	
	Δ P	Δ Q	Δ P	Δ Q
1	0,1208	0,1611	-0,1760	-0,2730
2	-0,2302	0,1980	0,3015	-0,2437
3	-0,2684	-0,3180	0,2946	0,3665
4	0,4303	-0,3648	-0,4625	0,3772
5	0,4787	0,5808	-0,4911	-0,5968
6	-0,7723	0,6303	0,7714	-0,6471
7	-0,8421	-1,0138	0,8265	1,0188
8	1,3211	-1,1134	-1,3358	1,0854
9	1,4227	-1,7549	-1,4459	-1,7270

TAB.2- Rede CEB/24 Caracterização de divergência pelo método (NRD) e (BSSI)

4.4.1.1. Aplicação da TDA com NRD e BSSI

Embora a relação R/X seja crítica na linha entre 10 e 11, outras linhas apresentam valores desfavoráveis. Com isso, diversas tentativas foram feitas com a técnica de "Desaceleração Angular". Como exemplo podem ser citadas:

CASO	k =	SOBRE AS BARRAS
1	2	10, 11
2	2	10, 11, 22, 24
3	2	12, 13, 14, 22, 24
	3	10, 11
4	2	5, 6, 7, 12, 13, 14, 20, 22, 24
	3	10, 11
5	3	10, 11
6	3	10, 11, 22
7	4	10, 11

TAB. 3 - Rede CEB/24. Tentativas com a técnica de "Desaceleração Angular"
Casos 1 e 2: ineficiente
Casos 3 -7 : positivos
Melhor caso: 5

ITERAÇÃO	ERRO NA POTÊNCIA / BARRA			
	P/10	P/11	Q/10	Q/11
7	0,0016	0,0064	0,0250	-0,0199
9	-0,0219	0,0201	-0,0136	0,0140
11	0,0151	-0,0151	0,0013	-0,0019
13	-0,0030	0,0033	0,0037	-0,0034
15	-0,0030	0,0027	-0,0030	0,0030
17	0,0031	-0,0030	0,0008	-0,0009
19	-0,0011	0,0012	0,0004	-0,0003
21	-0,0003	0,0002	-0,0005	0,0006

TAB.4- Rede CEB/24. Versão do caso 5 com reavaliação das matrizes jacobianas nas iterações 2,4,7,10,13, 16,19.

Para a Rede CEB/24 os estudos efetuados com a aplicação da técnica de "Desaceleração Angular" foi mais eficiente com o fator

k = 3 sobre as barras 10 e 11, ou seja, sobre os externos da linha que apresentava pior relação R/X. Reavaliações dos jacobianos em iterações intercaladas não diminuem a eficiência, sendo assim vantajosas pela economia do tempo de processamento.

Entretanto, este é apenas um exemplo particular. Cada rede deverá ser submetida a este tipo de pesquisa para que uma conclusão razoável a respeito do valor de k, bem como do procedimento iterativo a ser adotado, possa ser obtida.

4.4.1.2. Aplicação da TCR com NRD e BSSI.

Com $\Delta X = 0,0111$ (pu) esta técnica foi aplicada sobre a rede CEB/24 nas mesmas condições do caso 5, Tab. 3. Estipulando um erro de 0,01 (pu) para a convergência, 5 iterações foram economizadas na obtenção de uma solução equivalente. Isto mostra que para a mesma rede e mesmas condições de cálculo, a técnica de "Compensação Reativa" foi mais eficiente que a de "Desaceleração Angular".

Visto isto, embora com apenas uma comparação, a rede AEP/14 passou a ser utilizada pois, sendo menor, facilita a visualização de efeitos globais.

4.4.2. Testes com a Rede AEP/14

Inicialmente, uma análise do comportamento de convergência desta rede, em função do esquema anotado para a resolução dos sistemas de equações linearizados e, independentemente das técnicas corretivas, foi efetuada. Os melhores resultados obtidos com (BSSI) e (BSSU) serão dados a seguir.

ITERAÇÃO	ERRO NA POTÊNCIA / BARRA			
	P/12	P/13	Q/12	Q/13
5	0,0121	-0,0087	0,0186	0,0198
7	-0,0077	0,0072	-0,0074	-0,0019
9	0,0049	-0,0049	0,0036	-0,0014
11	-0,0031	0,0032	-0,0020	0,0015
13	0,0020	-0,0021	0,0012	-0,0011
15	-0,0012	0,0013	-0,0007	0,0007
17	0,0008	-0,0009	0,0005	-0,0005

Tab. 5- Rede AEP/14. Método (NRD), (BSSI) e reavaliação dos jacobianos somente na iteração.

MAIOR ERRO / BARRA NA ITERAÇÃO I					
I	5	7	9	10	11
I/A	0,01166	0,00418	0,00172	0,00111	0,00000
	12	12	13	13	
I/M	0,00887	0,00334	0,00139	0,00089	0,00089
	12	12	13	13	13

TAB. 6- Rede AEP/14 Método (NRD), (BSSU), reavaliação dos jacobianos somente na segunda iteração.

I/A simboliza a I-ésima iteração corretiva dos angulos e I/M a I-ésima iteração corretiva dos módulos das tensões nodais.

Novamente a (BSSU) se mostra mais eficiente que a (BSSI) mantidas outras condições de cálculo. Sendo assim, para os testes finais o método (NRD) foi utilizado somente com (BSSU).

Embora a Rede AEP/14 não apresenta divergência propriamente dita, a Técnica de "compensação reativa" foi sobre ela aplicada numa tentativa de novamente comprovar seus efeitos positivos. Para ΔX o valor adotado foi 0,20012 (pu).

USP Biblioteca CAMPUS DE SÃO CARLOS

4.4.2.1. Aplicação da TCR com NRD e BSSU

MAIOR |ERRO| / BARRA NA ITERAÇÃO I					
I	2	3	4	5	6
I/A	0,15902	0,02029	0,00518	0,00135	0,00004
	7	14	14	14	14
I/M	0,04005	0,01002	0,00267	0,00069	-
	14	14	14	14	-

TAB. 7 - Rede AEP/14. Método (NRD), (BSSU), "Compensação Reativa" sobre a linha entre as barras 12 e 13 e reavaliação dos jacobianos somente na 2ª iteração.

A Tab. 7 comparada com a Tab. 6 mostra que *a aplicação da "Compensação Reativa" conduz a uma solução equivalente em pelo menos 50% do tempo de processamento.*

4.5. Considerações Finais

Com base nos resultados obtidos pode-se dizer que:

1) A técnica da "Compensação Reativa" - TCR se mostrou superior em eficiência à de "Desaceleração Angular" - TDR.

2) A (BSSU) é um esquema melhor que a (BSSI) no cálculo iterativo das tensões nodais.

3) A reavaliação dos jacobianos apenas na segunda iteração contribuiu para melhorar ainda mais as características de convergência, pois economiza tempo de processamento.

Testes com a Técnica da "Compensação Reativa", valorizando ΔX no sentido de tornar R/X menor que 1/3, não mostraram melhoras nos resultados obtidos.

Um trabalho recém apresentado (1) trata este assunto de forma mais demorada e indica, também, outros artifícios para aprimorar as características de convergência dos métodos iterati

vos desacoplados.

Esta classe de métodos está hoje razoavelmente bem desenvolvida e sua utilização na Análise dos Fluxos de Potência, principalmente para problemas que exigem soluções não muito precisas, deve receber cada vez maior atenção.

Entretanto, cada rede e cada método devem ser entendidos como casos particulares e, estudos semelhantes aos aqui desenvolvidos, sobre eles efetuados.

5. CONCLUSÕES FINAIS

Os autores apresentam duas "variações" dentro das técnicas numericas classicas para determinar os regimes estacionários dos sistemas eletroenergéticos.

Os métodos são orientados para tipos especiais de redes e, à condição que haja tais particularidades, competem com os algoritmos tradicionais.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores querem expressar os seus agradecimentos à Companhia de Eletricidade de Brasília - CEB, por ter facilitado o acesso aos dados da sua rede de distribuição, e ao Dr. T.E. Dy Liacco (Cleveland Electric Illuminating Co., Cleveland, USA), por ter sugerido os artíficios utilizados nos ítens 4.3.1. e 4.3.2. do trabalho.

A N E X O 1

O AJUSTE DOS TRANSFORMADORES DE DERIVAÇÕES VARIÁVEIS

No transcurso do cálculo dos fluxos de potência, para manter as tensões dentro dos limites especificados, pode ser necessário alterar as derivações dos transformadores reguláveis sob-carga. Surge então a pergunta: qual(ais) transformador(es) deve(m) ser ajustado(s)?

Evidentemente, deseja-se que todas as tensões nodais sejam mantidas o mais próximo possível dos valores nominais. O controle sob um dado barramento deve ser tal que o transformador operado não altere em demasia outras tensões no sistema.

Na medida em que as tensões nodais são sensíveis às mudanças dos fluxos de potências reativas, é conveniente operar-se o transformador onde resulta um mínimo disturbio de fluxo de reativos. O transformador que produz este mínimo disturbio, será também de mínima interferência sobre as perdas do sistema. Propõe-se então variar as derivações dos transformadores próximos ao nó que necessitar a modificação da tensão nodal e escolher aquele que tiver a menor influência sobre o total de perdas do sistema. A sensibilidade das perdas de transmissão devido a uma pertubação das tensões nodais é facilmente calculada pelas formulas demonstradas em (6).

Considerando-se a matriz das admitâncias de (1) na forma cartesiana tem-se:

$$Y = G + j\,B \,. \qquad (1.1)$$

O valor das perdas de transmissão numa rede de energia elétrica pode ser calculado pela relação (6)

$$p = \langle A\ V,\ V \rangle \qquad (1.2)$$

onde,

$$A = \begin{bmatrix} G & 0 \\ 0 & G \end{bmatrix};\ V = \begin{bmatrix} E \\ F \end{bmatrix};\ E_i = U_i \cos \delta_i \text{ e } F_i = U_i \operatorname{sen} \delta_i ;$$

a variação das perdas, devido a uma variação do regime estacionário, pode ser calculado com a relação(6)

$$\Delta P = \langle G\ (\Delta E + 2E), \Delta E \rangle + \langle G\ (\Delta F + 2F), \Delta F \rangle \qquad (1.3)$$

Variações das perdas de potência com variações das tensões nodais têm sido investigadas e foram deduzidos coeficientes de sensibilidade (Algoritmo-S, (6),(7)). O transformador com o menor coeficiente de sensibilidade é escolhido para a mudança de derivado, a qual é representada pela modificação dos elementos da matriz de admitâncias nodais.

A N E X O 2

NOTA SOBRE O NÓ DE BALANÇO

Seja o problema

$$\min < AV, V > \qquad (2.1)$$

isto é, determinar o mínimo - livre (sem restrições) das perdas de transporte na rede de um sistema eletroenergético. Fisicamente, seria um regime com todas as tensões iguais e em fase, isto é, um regime de perdas iguais a zero. *A priori, este regime existe.*

A solução de (2.1) corresponde a

$$\nabla < AV, V >= 0,$$

isto é,

$$2\ AV = 0$$

e, considerando as notações do Anexo 1:

$$G\ E = 0 \qquad (2.2)$$

$$G\ F = 0 \qquad (2.3)$$

A matriz G é singular, enquanto que a matriz $\tilde{G}$ obtida pela supressão de uma linha e u uma coluna de G é não singular, o que representa a condição necessária para que os sistemas (2.2) e (2.3) tenham soluções não-triviais (diferentes de zero).

Seja o nó de referência (para angulos) o N-ésimo:

$$\delta_N = 0.$$

O sistema (2.3) leva então ao sistema (2.4)

$$\tilde{G}\ \tilde{F} = 0$$

isto é, a um sistema linear cuja unica solução é $\tilde{F} = 0$; admitindo que $U_i \neq 0$, $i = 1, \ldots, N - 1$, resulta então

$$\delta_i = 0 \quad , i = 1, \ldots, N - 1 \tag{2.5}$$

Com os resultados acima obtemos:

$$G\ U = 0, \tag{2.6}$$

onde U é o vetor N-dimensional dos modulos das tensões nodais, ' com $U_i \neq 0$, $i = 1, \ldots, N$.

O sistema (2.6) admite uma solução parametrica diferente de zero, pois:

$$\tilde{G}\ \tilde{U} + \tilde{U}^G = 0 \tag{2.7}$$

onde $\tilde{U}_i^G = G_{iN}\ U_N$, $i = 1, \ldots N - 1$. Sendo que $U_N \neq 0$, a solução $\tilde{U}^{\phi}$ de (2.7) será

$$\tilde{U}^{\phi} = - \tilde{G}^{-1}\ \tilde{U}^G \tag{2.8}$$

o que leva às conclusões:

a) para que o vetor dos modulos das tensões nodais seja diferente de zero, é necessário que haja uma tensão $U_N \neq 0$;

b) o valor U_N é fixado *a priori* e determina os níveis de tensão;

c) para que o problema (2.1) admita uma solução é preciso dar valores a um δ_i e, respectivamente, a um U_j, eventualmente $j \neq i$.

Observemos que o indice i = N foi escolhido apenas para simplificar o equacionamento; qualquer outro nó poderia ter sido escolhido no seu lugar.

B I B L I O G R A F I A

(1) CEPEDA, C.A. " A Modelagem de Redes Elétricas e a Análise dos Fluxos de Potência nos Sistemas Eletroenergéticos" dissertação de mestrado apresentada à EESC-USP, São Carlos , S.P., Março, 1977

(2) FEINGOLD, D., SPOHN, D. "Application des Calculateurs Arithmétiques aux Études de Réseaus Maillés: IV - Les Problèmes de répartion de puissance dans les réseaux maillés à courant alternatif - Analyse et Méthodes Numériques" Revue génerale de L'Électricité , Mars-Avril, pp. 681-696, 1967.

(3) STAGG, G.W., EL-ABIAD, A.H. "Computer Methods in Power System Analysis" Mac Graw-Hill Kogakusha, Ltda, 1968

(4) SAVULESCU, S.C. "Grafos, Dígrafos e Redes Elétricas - Aplicações na Pesquisa Operacional" Editora Almeida Neves, Rio de Janeiro, 1977

(5) GREGOIRE, C.A., SAVULESCU, S.C., TRECAT, J. "A Problem Oriented Algorithm to load Flow Computation in Distribution Networks" presented at IEEE-PES Winter Meeting, New York, Jan. 1973, paper C 73 102-1

(6) SAVULESCU, S.C . "La Sensibilité des Pertes de Transport dans le Réseaux d' Énergie" Revue E, vol VI, nº 6, Juin 1970, Bélgica

(7) GREGOIRE, C., SAVULESCU, S.C., TRECAT, J. "A new graphical concept for power systems: the Grapf GAMMA-S" IEEE PES Winter Meeting, New York, 1973, Paper CP 73 105-4.

(8) JOLISSAINT, C.H., ARVANITIDIS, N.V., LUENBERGER, D.G. "Decomposition of Real and Reactive Power Flows: A method suited for on-line application" IEEE Trans. PAS, vol 91, pp. 661-670, March/April, 1972

(9) STOTT, B. "Decoupled Newton Load Flow" IEEE Trans. PAS, vol 91 pp. 1955-1959, Sept/Oct. 1972.

Data 15/06/1984
Prog. 0184
F-08/DBT/84
Prof. Carlos Goldenberg
Doação