

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

CÁLCULO DE FLUXO DE CARGA DESACOPLADO:
MODELO DE MATRIZES CONSTANTES BASEADO
NA FILOSOFIA DE ACOPLAMENTO IMPLÍCITO

OSVALDO RONALD SAAVEDRA MÉNDEZ

Orientadores:

Prof. Dr. Alcir José Monticelli

Prof. Dr. Ariovaldo Verandio Garcia

Tese apresentada à Universidade Estadual de Campinas,
como parte dos requisitos para a obtenção do título
de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

- JUNHO 1988 -

Paraver de Tese

*Este exemplar corresponde a redação final
da tese defendida por Osvaldo Ronald Saavedra
Méndez e aprovada pela Comissão Julgadora em
14 de julho de 1988.*

UNICAMP

Alcyr Monticelli

"... NÃO POR SEUS PENSAMENTOS ELEVADOS
SERÃO EXAMINADOS SEUS LIVROS; MAS
ALGUMA FRASE AO ACASO, QUE PERMITA
CONCLUSÕES SOBRE ALGUNS ASPECTOS A
RESPEITO DOS QUE TECIAM CASACOS SERÁ
LIDA COM INTERESSE ..."

B. BRECHT

À minha família.

AGRADECIMENTOS

- Aos professores Alcir J. Monticelli e Ariovaldo V. Garcia pela excelente orientação, dedicação e estímulo dispensado;
- À Inecom Ingenieros Ltda que possibilitou meus estudos na UNICAMP;
- Aos meus colegas e amigos: Domingo, Jorge, Padilha, "Manolo" e Eduardo pelas sugestões, apoio e amizade;
- Aos professores do D.S.E.E. pelo apoio;
- À Sigmar pela cooperação dispensada;
- Aos que involuntariamente foram esquecidos, meu reconhecimento;
- À Ieda pelo excelente trabalho datilográfico e pela sua paciência.

RESUMO

Neste trabalho apresenta-se um estudo sobre a metodologia CRIC (Constrained Reactive Implicit Coupling) aplicada ao problema de cálculo de fluxo de carga quando o acoplamento entre os sub-problemas ativo e reativo não é desprezível. Realiza-se uma discussão geral dos métodos desacoplados envolvendo os fatores que influem nos seus desempenhos. É proposto um novo método de matrizes constantes denominado aqui "CRIC Constante", de robustez e simplicidade semelhante ao método desacoplado rápido, mas que apresenta melhor desempenho nos casos de razões R/X elevadas e em geral em situações de acoplamento ativo-reactivo não desprezível. São relatados testes em vários sistemas, tanto de distribuição como de transmissão, nos quais confirma-se a superioridade do método CRIC Constante sobre o método desacoplado rápido. É apresentada também uma análise teórica que procura justificar o comportamento empírico dos métodos desacoplados.

ÍNDICE

CAPÍTULO I : INTRODUÇÃO	01
CAPÍTULO II : FLUXO DE CARGA: FORMULAÇÃO E RESOLUÇÃO	04
2.1 - Aspectos Gerais	04
2.2 - Formulação Básica	06
2.3 - Resolução: Aspectos Gerais	08
2.4 - Resenha Histórica	08
2.5 - Método de Newton-Raphson	10
CAPÍTULO III : DESACOPLAMENTO P θ -QV	15
3.1 - Fundamentos	15
3.2 - Estratégias de Resolução	16
3.3 - Método Newton Desacoplado	16
3.4 - Método Desacoplado Rápido	18
3.5 - Comentários sobre a Linearização nos Métodos Desacoplados	21
CAPÍTULO IV : ACOPLAMENTO IMPLÍCITO	23
4.1 - Motivação Inicial	23
4.2 - Princípios do Método CRIC para Fluxo de Carga Convencional	26
4.3 - Desacoplamento Teórico	27
4.4 - Desacoplamento Prático	28

4.5 - Análise Gráfica Comparativa dos Métodos CRIC e Newton Desacoplado	31
4.5.1 - Efeito da razão R/X no sub-problema reativo	31
4.5.2 - Efeito do carregamento no sub- problema reativo	34
4.5.3 - Situações de acoplamento ativo- reativo não desprezível	39
4.5.4 - Comentários sobre a linearização no método CRIC	43
4.6 - Características Q(V) com Potência Ativa Constante : Limites Físicos	43
4.7 - Teste de Desempenho dos Métodos CRIC e Newton Desacoplado	47
4.8 - CRIC : Modelo Constante	50
4.9 - Discussão sobre os Modelos Constantes	52
CAPÍTULO V : TESTES E RESULTADOS	59
5.1 - Sistema de Duas Barras	59
5.2 - Sistemas IEEE	63
5.3 - Redes de Distribuição	65
5.4 - Redes Brasileiras	67
CAPÍTULO VI : COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES	69
6.1 - Acoplamento Implícito: Métodos CRIC e CRIC Constante	69

6.2 - Linearização no Problema de Fluxo de Carga e Características dos Métodos de Matrizes Constantes	72
6.3 - Extensões de Metodologia do Acoplamento Implícito: Trabalhos Futuros e em Andamento	73

APÊNDICES

APÊNDICE A: DEDUÇÃO DAS EXPRESSÕES PARA O MÉTODOS "CRIC"	75
A.1 - Definições Preliminares	75
A.2 - Determinação de $Q(V)$	78
A.3 - Determinação da Sensibilidade L_C	79
APÊNDICE B : MODELO NORMALIZADO	83
B.1 - Método CRIC Normalizado	83
B.2 - CRIC Normalizado: Versão Constante	88
REFERÊNCIAS	93

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Existem problemas para os quais as hipóteses clássicas de desacoplamento $P\theta$ -QV do cálculo de fluxo de carga não são válidas. Isto acontece, por exemplo, em casos de sistemas de baixa tensão e em redes com alto carregamento.

Carpentier propõe um método para considerar o acoplamento de maneira implícita (CRIC : Constrained Reactive Implicit Coupling). Este método foi sugerido para várias aplicações e enfatizado para o fluxo de carga ótimo.

Neste trabalho realiza-se uma análise crítica e exploratória dessa metodologia, especificamente na área de cálculo de fluxo de carga convencional para redes de energia elétrica. Além disso é proposto e analisado o método "CRIC Constante", realizando-se também um estudo dos aspectos que sustentam a sua eficiência, em especial para situações de acoplamento não desprezível e ampliando-se essa discussão a todos os métodos desacoplados. Neste contexto estabelecem-se importantes conclusões com relação aos elementos que influem no desempenho de todos estes métodos.

Os resultados obtidos com os métodos CRIC e CRIC-Cte, são motivadores, especialmente para aplicações em sistemas com linhas de ângulos de perda altos (razões R/X elevadas), e em redes muito carregadas, contrastando com a simplicidade

dos modelos estudados e/ou propostos.

No Capítulo II apresentam-se aspectos e formulação básicos do problema de cálculo de Fluxo de Carga, além de uma breve revisão histórica e crítica das técnicas de resolução até o surgimento do método Newton-Raphson.

No Capítulo III apresentam-se os princípios físicos que possibilitam o desacoplamento do problema de cálculo de fluxo de carga e se realiza uma revisão dos métodos de Newton Desacoplado e Desacoplado Rápido. Discutem-se também aspectos relativos à linearidade e a sua influência no desempenho dos métodos desacoplados.

No Capítulo IV é estudado o método CRIC aplicado ao cálculo de fluxo de carga. Compara-se o seu desempenho com o método Newton-Desacoplado em condições de acoplamento não desprezível. Também é proposto o método "CRIC Constante" realizando-se o seu estudo comparativo com o método Desacoplado Rápido. Analisa-se a influência da linearização nos métodos de cálculo de fluxo de carga desacoplados e discutem-se os aspectos que caracterizam o bom desempenho dos métodos de matrizes constantes (desacoplado rápido e CRIC Constante).

No Capítulo V reúnem-se resultados de testes da metodologia estudada e do modelo proposto, utilizando-se os sistemas IEEE 30, IEEE 118 e redes de alta e baixa tensão brasileiras. Comparam-se os seus desempenhos com os métodos desacoplados clássicos.

No Capítulo VI sintetizam-se as conclusões deste trabalho. Incluem-se comentários com relação às extensões possíveis do método CRIC, de aplicações já concretizadas e de pesquisas atualmente em andamento.

No Apêndice A encontra-se a dedução geral da matriz L_c do método CRIC.

No Apêndice B apresenta-se o desenvolvimento matemático do modelo "CRIC Normalizado", cuja pesquisa está atualmente em andamento. Inclui-se também a sua versão de matrizes cons-

tantes, acompanhada de alguns resultados obtidos utilizando re
des IEEE e sistemas brasileiros de alta tensão.

CAPÍTULO II

FLUXO DE CARGA: FORMULAÇÃO E RESOLUÇÃO

Neste capítulo são apresentados primeiramente aspectos básicos do problema de cálculo de fluxo de carga, tais como seus objetivos e requisitos que deve cumprir segundo a aplicação, seguido da formulação matemática do problema e sua resolução.

Em seguida, realiza-se um breve resumo histórico do desenvolvimento de métodos de fluxo de carga até chegar ao método de Newton Raphson. Para ele realiza-se a sua apresentação formal, pela importância que tem como metodologia de propósito geral, de onde podem-se deduzir os métodos de cálculo de fluxo de carga utilizados atualmente.

2.1 - Aspectos Gerais

O cálculo de fluxo de potência ou carga numa rede elétrica é de vital importância, já que fornece as condições de operação estática do sistema, ou em outras palavras, o estado do sistema. Para sua determinação, a rede é representada analiticamente por um conjunto de equações e inequações algébricas essencialmente não lineares, onde se fornecem determinadas condições de operação (dados especificados) para se calcular igual número de incógnitas (ângulos e tensões nas bar-

ras tipo PQ, ângulos e potência reativa nas barras tipo PV e potência ativa e reativa nas barras de folga).

O cálculo de fluxo de carga é requerido em planejamento da expansão e operação de um sistema elétrico, e também no seu controle e operação. Assim para cada caso, ele vai estar submetido a diferentes requisitos, o que é refletido em exigências para o "software" (método matemático) e "hardware" computacional, influenciando substancialmente na escolha do método a usar. Para caracterizar melhor o confronto método-aplicação, na tabela (2.1) encontra-se um breve resumo de alguns tipos de soluções mais comuns de fluxo de carga e os requisitos para os métodos utilizados. Em geral, cada aplicação vai precisar de uma combinação de tipos e exigências das resumidas na tabela (2.1).

TIPOS DE SOLUÇÕES	
Exata	Aproximada
Sem ajustes	Com ajustes
Off-line	On-line
Caso simples	Casos múltiplos

Tabela (2.1.a)

REQUISITOS PARA O MÉTODO	
REQUISITOS	ESPECIALMENTE PARA:
Alta velocidade	Sistemas de grande porte Aplicações em tempo real Casos múltiplos Aplicações interativas
Pouco espaço de armazenamento	Sistemas de grande porte
Confiabilidade	Problemas mal condicionados Estudos de contingência Aplicações em tempo real
Versatilidade	Capacidade para manipular aspectos convencionais e especiais tais como ajustes e representação de dispositivos. Adequação para incorporação em processos mais complicados.
Simplicidade	Fácil de codificar, modificar e aumentar o seu algoritmo e programa computacional

Tabela (2.1.b)

Tabela (2.1): Cálculo de Fluxo de Carga [2]

(a) Tipos de soluções

(b) Requisitos

2.2 - Formulação básica

Assumindo o sistema de potência trifásico equilibrado, ele pode ser representado por sua rede de sequência positiva [2], constituída por impedâncias lineares séries e shunt. Por outro lado, assumindo tacitamente um regime permanente, adota-se para o cálculo de fluxo de carga a análise fasorial no

dal. Isto é, em outras palavras, aceitar o fato que as perturbações num sistema elétrico variam muito lentamente.

De acordo com as restrições operacionais impostas nas barras, elas se classificam em três tipos:

Barras P-Q: Aquelas onde são conhecidas a priori as injeções de potência ativa e reativa.

Barras P-V: Aquelas que têm especificadas a injeção de potência ativa e o módulo da tensão.

Barra V- θ : (Slack, ou de referência): Aquela que fornece a referência angular para o sistema, tendo a tensão especificada. Ela cumpre a função de fechar o balanço de potência na rede, já que as perdas não são conhecidas previamente.

As equações básicas de fluxo de carga são deduzidas pela aplicação das leis de Kirchhoff à rede elétrica [1], resultando:

$$P_k = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (2.1)$$

$$Q_k = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km})$$

Onde:

P_k, Q_k : Potências líquidas ativa e reativa respectivamente na barra k.

V_k, V_m : Módulos das tensões nas barras k e m.

G_{km}, B_{km} : Condutância e susceptância da matriz Y do sistema, respectivamente.

$\theta_{km} = \theta_k - \theta_m$: Abertura angular entre as barras k e m.

K : Conjunto de todas as barras vizinhas a k, incluindo ela mesma.

Deseja-se, então, resolver o conjunto de equações (2.1), submetido às restrições operacionais implícitas nos tipos

das barras do sistema para assim conhecer as tensões fasoriais (módulo e ângulo) em todas elas.

2.3 - Resolução: Aspectos Gerais

Na determinação do estado do sistema, precisa-se resolver o conjunto de equações não lineares (2.1) onde as incógnitas (V, θ) aparecem em forma implícita, o qual exige um processo iterativo para sua resolução.

Consideradas as restrições operacionais das barras nas expressões (2.1), a solução do cálculo de fluxo de carga é atingida se:

$$|\Delta P_k| = |P_k^e - P_k| \leq \epsilon_p \quad (2.2.a)$$

onde k é uma barra tipo PQ ou PV e P_k^e é a injeção de potência ativa especificada.

$$|\Delta Q_k| = |Q_k^e - Q_k| \leq \epsilon_q \quad (2.2.b)$$

onde k é uma barra tipo PQ e Q_k^e é a injeção de potência reativa especificada.

As tolerâncias ϵ_p e ϵ_q são escolhidas de acordo com a precisão exigida pela aplicação específica. Os métodos iterativos utilizados para resolver (2.1) tem evoluído rapidamente, especialmente da década de 70 até hoje. Uma breve revisão histórica para estabelecer o surgimento do método Newton Raphson dentro dessa evolução é feita a seguir.

2.4 - Resenha Histórica

O cálculo de fluxo de carga foi realizado originalmente utilizando-se analisadores de redes, e continuou até mesmo após do surgimento do computador digital. A literatura registra em 1956 a primeira solução computadorizada para o problema de fluxo de carga publicada por Ward e Hale [3], seguida logo de outras versões, todas usando métodos iterativos

com matriz Y (métodos de ajustes locais). Tais métodos são em essência o equivalente matemático das estratégias de ajustes desenvolvidas em forma intuitiva no analisador de redes para cálculo de fluxo de potência. Em suas diferentes versões, eles foram adequados nas primeiras gerações de computadores, já que requerem espaço de armazenamento mínimo. Seu desempenho é bom em muitos problemas, porém com convergência lenta devido à perda de acoplamento matemático entre as barras, já que em cada iteração a correção da tensão em uma determinada barra apenas melhora as tensões das barras conectadas diretamente. Além disso, a sua convergência está muito ligada à dominância diagonal da matriz de processo, que é enfraquecida pela junção dentro de um mesmo sistema, de impedâncias séries muito altas e muito baixas, capacitâncias elevadas e compensação série e shunt.

As desvantagens dos métodos de ajustes locais incentivaram o desenvolvimento dos métodos de ajustes globais, inicialmente aqueles usando matriz Z . Estes últimos se caracterizam por uma convergência mais confiável e rápida que os anteriores, já que cada tensão de barra está acoplada com todas as injeções de correntes de barras no processo de cálculo. Apesar de as necessidades de armazenamento serem apreciáveis já que Z não é esparsa, hoje isto pode ser resolvido eficientemente utilizando os fatores triangulares da matriz esparsa Y ; porém, o desempenho do método é afetado negativamente pela presença de barras PV, já que o processo não é capaz de distinguir entre as correntes usadas como sendo provenientes de barras PV ou PQ, motivando que a convergência seja mais lenta, e em aplicações de grande porte atingindo tempos proibitivos.

O método Newton-Raphson (N.R.), também considerado dentro dos métodos de ajustes globais, apresentou-se interessante pelas suas poderosas propriedades de convergência, mas não competitivo computacionalmente no início, dada a necessidade de se obter a inversa do Jacobiano explicitamente.

O maior avanço na computação aplicada aos sistemas de

potência foi o desenvolvimento de Tinney e outros [4] do método de solução direta de redes esparsas com fatoração triangular com ordem ótima. Isto melhorou drasticamente os requisitos de armazenamento e a velocidade de processamento do método N.R., fazendo-o factível de se utilizar, constituindo-se num proeminente método de propósito geral.

Os posteriores avanços de maior importância tem sido baseados em ele visando minimizar as necessidades de memória e tempo de processamento. Tais esforços situam-se a partir de 1972 com a publicação por B. Stott [6] do modelo Newton Desacoplado (N.D.), e posteriormente com o popular método Desacoplado Rápido (D.R.) de Stott e Alsac [7].

2.5 - Método Newton-Raphson [1], [9]

O método Newton-Raphson é uma técnica iterativa para resolver um conjunto de equações não-lineares para um número igual de incógnitas.

Seja o conjunto de n equações e n incógnitas:

$$F(X) = \begin{cases} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = k_1 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = k_2 \\ \vdots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = k_3 \end{cases} \quad (2.3)$$

Em cada ponto de iteração cada função $f_i(X)$ é aproximada a seu hiperplano tangente, o que gera nessa vizinhança um problema linearizado definido como:

$$F(X) = -J \cdot \Delta X \quad (2.4)$$

onde J é a matriz Jacobiana da função multivariável $F(X)$, e ΔX é o vetor de perturbação (dito, de correção) em torno do ponto de linearização.

A matriz J é formada pelas inclinações dos hi-

perplanos tangentes, caracterizando-se por ser altamente esparsa em casos de sistemas elétricos, o que permite sua resolução rápida utilizando técnicas de esparsidade e fatoração com ordem ótima [10].

O método N.R. tem uma convergência de comportamento quadrático, isto é, com uma rapidez que não há lugar para comparação com os métodos anteriores. Sua eficiência aumenta na medida que a estimativa de solução está perto da verdadeira, constituindo-se no método mais eficiente em convergência local.

Seu desempenho está muito relacionado com o tipo de função $F(X)$; na medida que ela seja mais linear, o método N.R. convergirá mais rápida e confiavelmente. Porém, se a função $F(X)$ apresenta na região de interesse características extremamente não lineares pode causar convergências demoradas, colapso total, ou a orientação do processo para uma solução falsa (sem sentido físico). Em geral, em aplicações de fluxo de carga, as funções que aparecem não são excessivamente não lineares. Além disso, é possível inicializar o processo com uma boa estimativa, o que faz que as dificuldades comentadas acima dificilmente aconteçam. Outra característica favorável do método N.R. é a sua insensibilidade à escolha da barra de referência e à presença de compensação série, aspectos altamente críticos para outros métodos [2].

Versão Polar

A formulação de uso mais generalizado adota os "mismatches" de potência de barra como função $F(X)$, e como incógnitas as tensões e ângulos nodais.

Para seu tratamento analítico a potência complexa de barra é separada em suas duas componentes, real e imaginária. Esta formulação é conhecida como a Versão Polar, de ampla difusão na literatura.

A equação (2.5) mostra a forma polar do método N.R., onde o Jacobiano foi particionado em 4 submatrizes

$$\begin{array}{|c|} \hline \Delta P \\ \hline \Delta Q \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|} \hline H & N \\ \hline M & L \\ \hline \end{array} \cdot \begin{array}{|c|} \hline \Delta \theta \\ \hline \Delta V \\ \hline \end{array} \quad (2.5)$$

Onde:

$$\Delta P = P^e - P ;$$

$\Delta Q = Q^e - Q$; são os vetores de "mismatches" de potências líquidas ativa e reativa, respectivamente.

$\Delta V, \Delta \theta$; vetores de correções de tensão e ângulo, respectivamente.

$$H = \frac{\partial P}{\partial \theta} , N = \frac{\partial P}{\partial V}$$

$M = \frac{\partial Q}{\partial \theta} , L = \frac{\partial Q}{\partial V}$; são as submatrizes Jacobianas, cujas deduções se encontram na referência [1].

A barra de referência não é incluída em (2.5), nem os "mismatches" de potência reativa das barras PV. Consequentemente, a ordem da equação (2.5) é $(2NPQ + NPV)$, onde NPQ e NPV são os números de barras PQ e PV respectivamente, do sistema.

Como se comentou antes, a matriz Jacobiana é altamente esparsa já que tem elementos apenas nas posições onde existem ligações entre os nós respectivos. Por outro lado apresenta simetria em estrutura, porém não em valores, sendo necessário armazenar todos os seus elementos.

Inicialização

O método N.R. apresenta excelente característica de convergência local. Neste sentido, ele extrai máxima vantagem do ponto de inicialização. É, então, lógico o aproveitamento dessa propriedade procurando-se fornecer uma estimativa inicial de boa qualidade, ou seja, próxima da solução. Isto po-

de ser feito utilizando como estimativa uma solução anterior, previamente armazenada, que difira pouco do novo estado do sistema. Em algumas aplicações utilizou-se como estratégia de inicialização realizar uma ou duas iterações Gauss-Seidel antes de inicializar o processo N.R. [5]. Uma maneira mais rápida e confiável de calcular uma estimativa inicial foi proposta por Stott, na qual o valor de inicialização dos ângulos é obtido utilizando-se fluxo de carga C.C. e seguidamente estes valores são utilizados no cálculo das magnitudes das tensões iniciais mediante uma técnica similar de solução direta [11].

Convergência

A versão polar converge com grande exatidão, demorando tipicamente de 2 a 5 iterações quando é inicializada com "Flat Start", independente do tamanho do sistema.

Porém, podem apresentar-se regiões de interesse (vizinhança do ponto de linearização) com comportamento fortemente não linear que leva a demora na convergência e até divergência. Uma melhora considerável pode-se obter dividindo-se ΔQ pelo vetor de tensões de barras na equação (2.5). Esta mudança reduz o grau de não linearidade da função, permitindo obter um menor número de iterações e evitar, em alguns casos, a divergência.

Para o caso do vetor ΔP , a normalização pelo vetor V pode ser benéfica, mas em geral o efeito é pequeno devido ao acoplamento fraco da potência ativa e a tensão.

Consideradas tais modificações, a equação (2.5) fica:

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta P}{V} \\ \frac{\Delta Q}{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H' & N' \\ M' & L' \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

onde H' , N' , M' e L' são as submatrizes Jacobianas normalizadas [1].

As técnicas de esparsidade e eliminação ordenada são essenciais para se obter tempo de execução e armazenamento pequenos. Se esses requisitos são satisfeitos, então o tempo de computação por cada iteração cresce em média aproximadamente com o número de barras do sistema.

Já que o número de iterações praticamente é invariante com o tamanho do sistema, a superioridade do método N.R. com relação aos outros se faz mais evidente quando se resolvem sistemas maiores.

O próximo capítulo é dedicado exclusivamente para tratar os modelos desacoplados que podem ser deduzidos a partir do método N.R.

CAPÍTULO III

DESACOPLAMENTO P θ - QV3.1 - Fundamentos

A idéia do desacoplamento surge das características inerentes de um sistema elétrico prático operando em regime permanente. Nele se verifica uma forte interdependência entre as potências ativas e os ângulos das tensões de barras e entre as potências reativas e as magnitudes das ditas tensões. Este fenômeno é conhecido como acoplamento P- θ e acoplamento Q-V respectivamente. Por outro lado, as sensibilidades potência ativa vs. magnitude de tensão e potência reativa vs. ângulo de tensão são comparativamente pequenas às anteriores. Isto em geral se verifica em redes de extra-alta tensão (maior que 230KV) e ultra-alta tensão (maior que 750 KV). Em tais condições o processo numérico da equação (2.5) está operando com dois conjuntos de equações praticamente independentes, o que sugere um tratamento individual de resolução para cada um deles. Tem-se então, o desacoplamento do problema original em dois sub-problemas, a dizer, o sub-problema ativo que determina o vetor de estado θ , e o sub-problema reativo que determina o vetor de estado V.

O tratamento separado destes sub-problemas não altera a solução final, já que o problema a resolver continua o mesmo ($\Delta P = 0$, $\Delta Q = 0$), mudando apenas a trajetória do processo

de convergência.

3.2 - Estratégias de resolução

Em 1963, J.L. Carpentier [12], já sugeria o desacoplamento P θ -QV, com o que a equação (2.5) se transforma em:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & O \\ O & L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

onde se desprezam as matrizes de sensibilidades N e M.

A determinação de $\Delta \theta$ e ΔV realiza-se de forma simultânea, tal como em (2.5), com a vantagem das diminuições em cálculo e armazenamento pelo drástico aumento da esparsidade do Jacobiano. Para melhorar as soluções, nas posteriores iterações pode-se reavaliar o Jacobiano, utilizando o desacoplamento apenas para inicializar o processo.

Em 1972, B. Stott [6] propôs o modelo Newton Desacoplado com solução alternada, que consiste basicamente em uma versão do método Gauss-Seidel aplicado por blocos, onde se resolvem duas equações matriciais: os sub-problemas ativo e reativo.

Esta estratégia de resolução é hoje muito utilizada, e é abordada com mais detalhes na próxima seção.

3.3 - Método Newton Desacoplado [6]

Consideradas as hipóteses de desacoplamento já comentadas, o problema de cálculo de fluxo de carga pode-se representar pela equação (3.1). Na formulação do método Newton Desacoplado (N.D.), as equações correspondentes aos sub-problemas ativo e reativo são resolvidas separadas e alternadamente. Considerando isto, a equação (3.1) pode ser reescrita:

$$\begin{aligned}\Delta P &= H \Delta \theta \\ \Delta Q &= L \Delta V\end{aligned}\tag{3.2}$$

Quando se resolve o sub-problema ativo e o novo valor para os ângulos é conhecido, este é utilizado de imediato na resolução do sub-problema reativo. Analogamente, quando se determina o novo valor das magnitudes das tensões, estes são usados no sub-problema ativo imediatamente.

Em forma algorítmica a resolução de (3.2) fica:

$$\begin{aligned}\Delta P(V^v, \theta^v) \\ \Delta \theta &= H^{-1}(V^v, \theta^v) \cdot \Delta P(V^v, \theta^v) \\ \theta^{v+1} &= \theta^v + \Delta \theta \\ \Delta Q(V^v, \theta^{v+1}) \\ \Delta V &= L^{-1}(V^v, \theta^{v+1}) \cdot \Delta Q(V^v, \theta^{v+1}) \\ V^{v+1} &= V^v + \Delta V\end{aligned}\tag{3.3}$$

Para melhorar o desempenho do método N.D., adota-se a mesma modificação da seção (2.5) no sentido de reduzir a não linearidade do problema reativo. Então (3.2) fica:

$$\begin{aligned}\Delta P/V &= H' \Delta \theta \\ \Delta Q/V &= L' \Delta V\end{aligned}\tag{3.4}$$

onde estas novas equações substituem (3.2) no algoritmo (3.3).

Para precisões práticas (1 MW e 1 MVAR, por exemplo), o modelo N.D. tem convergência similar à do modelo Newton-Raphson. Porém, quando se exige uma maior precisão, o número de iterações no N.D. é superior, já que a aproximação em (3.2) não conserva a característica de convergência quadrática do modelo N.R.

As matrizes H, L, H' e L', similarmente ao Jacobiano, são simétricas em estrutura, mas não em valores. Com relação ao método N.R. a economia de espaço é muito significativa, a-

lém da considerável diminuição de tempo de processamento.

O desempenho do método N.D. é bom na medida que sejam satisfeitas as hipóteses de desacoplamento. Se é utilizado em redes com acoplamento forte (por exemplo, redes de baixa tensão), é provável que aconteça uma convergência proibitivamente demorada, divergência ou até convergência a soluções falsas (sem sentido prático).

3.4 - Método Desacoplado Rápido [7]

O método desacoplado rápido (D.R.) utiliza o mesmo algoritmo (3.3) do método anterior. A diferença é que as matrizes consideradas aqui são constantes e são derivadas de aproximações feitas sobre as matrizes do método N.D.

Considere-se as expressões explícitas das matrizes H' e L' [1]:

$$\begin{aligned}
 H'_{km} &= V_m (G_{km} \operatorname{sen} \theta_{km} - B_{km} \operatorname{cos} \theta_{km}) \\
 L'_{km} &= (G_{km} \operatorname{sen} \theta_{km} - B_{km} \operatorname{cos} \theta_{km}) \\
 H'_{kk} &= -Q_k / V_k - V_k B_{kk} \\
 L'_{kk} &= Q_k / V_k^2 - B_{kk}
 \end{aligned}
 \tag{3.5}$$

Nas expressões anteriores é possível fazer as seguintes aproximações

- i) $\operatorname{cos} \theta_{km}$ é muito próximo de 1
- ii) A magnitude de B_{km} é muito maior que $G_{km} \operatorname{sen} \theta_{km}$
- iii) A magnitude de $B_{kk} V_k^2$ é muito maior que Q_k

As duas primeiras hipóteses valem em geral em redes de EAT e UAT, onde as razões R/X das linhas são baixas, da ordem de 20% ou menos. A aproximação (iii) se baseia no fato que as susceptâncias shunt de um sistema são muito maiores que as reatâncias séries.

Considerando-se essas hipóteses, as expressões (3.5) fi-

cam:

$$\begin{aligned}
 H'_{km} &\cong V_m B_{km} \\
 H'_{kk} &\cong -V_k B_{kk} \\
 L'_{km} &\cong -B_{km} \\
 L'_{kk} &\cong -B_{kk}
 \end{aligned}
 \tag{3.6}$$

Outra aproximação que pode ser feita, é considerar a ten são perto da unidade. Então:

$$H' \cong B' \left\{ \begin{array}{l} = -B_{kk} \\ = -B_{km} \quad k \neq m \end{array} \right.
 \tag{3.6.a}$$

$$L' \cong B'' \left\{ \begin{array}{l} = -B_{kk} \\ = -B_{km} \quad k \neq m \end{array} \right.
 \tag{3.6.b}$$

As matrizes B' e B'' têm as seguintes qualidades:

- Dependem exclusivamente de parâmetros da rede
- Mantém a estrutura de H e L
- São simétricas
- São semelhantes à matriz susceptância B da rede, com a diferença que B' não contém a equação da barra de referência, enquanto que B'' não contém as equações das barras PV nem $V\theta$.

O desempenho do método pode melhorar usando-se o critério de desprezar as resistências séries na formação da matriz B' , o qual é válido em redes de alta tensão. Considerando-se esta nova aproximação, as matrizes do método desacoplado rápido ficam:

$$B' \left\{ \begin{array}{l} B'_{kk} = \sum_{k \neq m} 1/X_{km} \\ B'_{km} = -1/X_{km} \end{array} \right.
 \tag{3.7.a}$$

$$B'' \left\{ \begin{array}{l} B''_{kk} = -B_{kk} \\ B''_{km} = -B_{km} \end{array} \right. \quad (3.7.b)$$

e as equações (3.4) se transformam em:

$$\Delta P/V = B' \Delta \theta \quad (3.8.a)$$

$$\Delta Q/V = B'' \Delta V \quad (3.8.b)$$

As matrizes B' e B'' de (3.8) representam aproximações constantes das inclinações dos hiperplanos tangentes das funções $\Delta P/V$ e $\Delta Q/V$, respectivamente. De fato elas são muito próximas das sub-matrizes Jacobianas calculadas com a rede em vazio (sem carga), o que dá uma boa aproximação na primeira iteração do método D.R. quando se inicializa em "flat start".

A formulação (3.7) do método D.R. tem dificuldades sérias de convergência em aplicações onde as admitâncias shunt são muito elevadas, como são os casos que envolvem equivalentes externos. Uma versão modificada [1] que resolve este problema, envolve a inclusão na diagonal da matriz B'' das susceptâncias shunt multiplicadas por um fator 2.

Considere-se o elemento diagonal da matriz L' :

$$\begin{aligned} L'_{kk} &= -B_{km} + Q_k/V_k^2 \\ &= \sum_{k \neq m} b_{km} - (b_k^S + \sum_{k \neq m} b_{km}^S) + Q_k/V_k^2 \end{aligned} \quad (3.9)$$

A hipótese (iii) considera Q_k desprezível em relação a $V_k^2 B_{kk}$. Porém, em aplicações tais como equivalentes externos essa aproximação não é válida, ou seja, a potência reativa consumida ou gerada pelos elementos shunt não é desprezível. Logo, explicitando a potência reativa na equação (3.9), e assumindo válidas as aproximações (i) e (ii) com tensões unitárias, chega-se à versão modificada do método D.R.:

$$L'_{kk} \cong B''_{kk} = - \sum_{k \neq m} b_{km} - 2 BSH_k \quad (3.10)$$

onde:

$$BSH_k = b_k^S + \sum_{k \neq m} b_{km}^S$$

Nota-se que a expressão (3.10) é equivalente a calcular o elemento diagonal L'_{kk} (ou L_{kk}) no ponto $V=1, \theta=0$.

A versão assim obtida é de reconhecida robustez e confiabilidade contrastando com a sua simplicidade e baixo custo computacional.

A simetria de suas matrizes permite calcular e armazenar apenas o triângulo superior de fatores, o que é feito no início do processo. As consecutivas soluções para (3.8.a) e (3.8.b) são obtidas fazendo-se substituições "forward" e "backward" utilizando-se esses fatores. Diferentemente do Newton Desacoplado, o D.R. tem bom desempenho ainda em sistemas medianamente acoplados, como é o caso de redes com razões R/X que não excedam muito a unidade.

3.5 - Comentários sobre a Linearização nos Métodos Desacoplados

Até aqui tem-se acompanhado um processo de aproximações sobre o método Newton-Raphson visando inicialmente obter benefícios computacionais. Considerando este método como "padrão", por levar em conta todas as derivadas parciais, o método N.D. utiliza uma "aproximação" delas, o que constitui matematicamente uma queda da qualidade da linearização da função original, já que se desprezam as contribuições de um sub-conjunto de variáveis de estado. Porém, apesar desse fato, para precisões moderadas em aplicações em A.T. o método N.D. apresenta desempenho global melhor que o Newton-Raphson.

Por outro lado, o método D.R. utiliza uma versão aproximada constante das derivadas do método N.D. A sub-matriz ativa B' é equivalente a calcular a sub-matriz H no ponto $V=1, \theta=0$, com todas as resistências das linhas e transformadores iguais a zero. A sub-matriz B'' é simplesmente a ma-

triz L avaliada no ponto $V=1$, $\theta=0$. É evidente que se tem piorado ainda mais a linearização do problema original, porém o desempenho do método D.R. é muito superior ao N.D.

Assim, na procura de benefícios computacionais, tem-se obtido, além disso, um modelo mais eficiente e simples como metodologia de cálculo, utilizando uma linearização do problema original de inferior qualidade.

Estes fatos, que se apresentam aparentemente contraditórios, levantam uma discussão da influência ou não da linearização no cálculo de fluxo de carga convencional. O tema será retomado mais adiante quando for apresentado o modelo CRIC-constante.

CAPÍTULO IV

ACOPLAMENTO IMPLÍCITO

No Capítulo III foram estudados os aspectos básicos do desacoplamento. O método D.R. funciona muito bem para sistemas de alta tensão ($R/X \ll 1$), mas pode apresentar dificuldades de convergência quando aplicado a sistemas onde o acoplamento entre os problemas P θ e QV é importante (sistemas de distribuição, por exemplo). Carpentier [18] sugeriu um procedimento para se levar em conta este tipo de acoplamento nos métodos desacoplados. Esta metodologia é chamada "acoplamento implícito" e tenta unir a simplicidade dos métodos desacoplados com a confiabilidade do método Newton-Raphson.

No trabalho original, esta metodologia está orientada principalmente ao problema de fluxo de carga ótimo, dando-se ênfase na melhora da linearização do sub-problema QV. Mais adiante será visto que esta não é a principal preocupação do problema de fluxo de carga convencional.

4.1 - Motivação Inicial

Nas figuras (4.1) e (4.2) mostram-se exemplos de evolução de convergência para o método D.R. A característica ideal esperada para um sistema totalmente desacoplado é tal que não existam perturbações θ -Q e V-P. Porém em casos práticos de

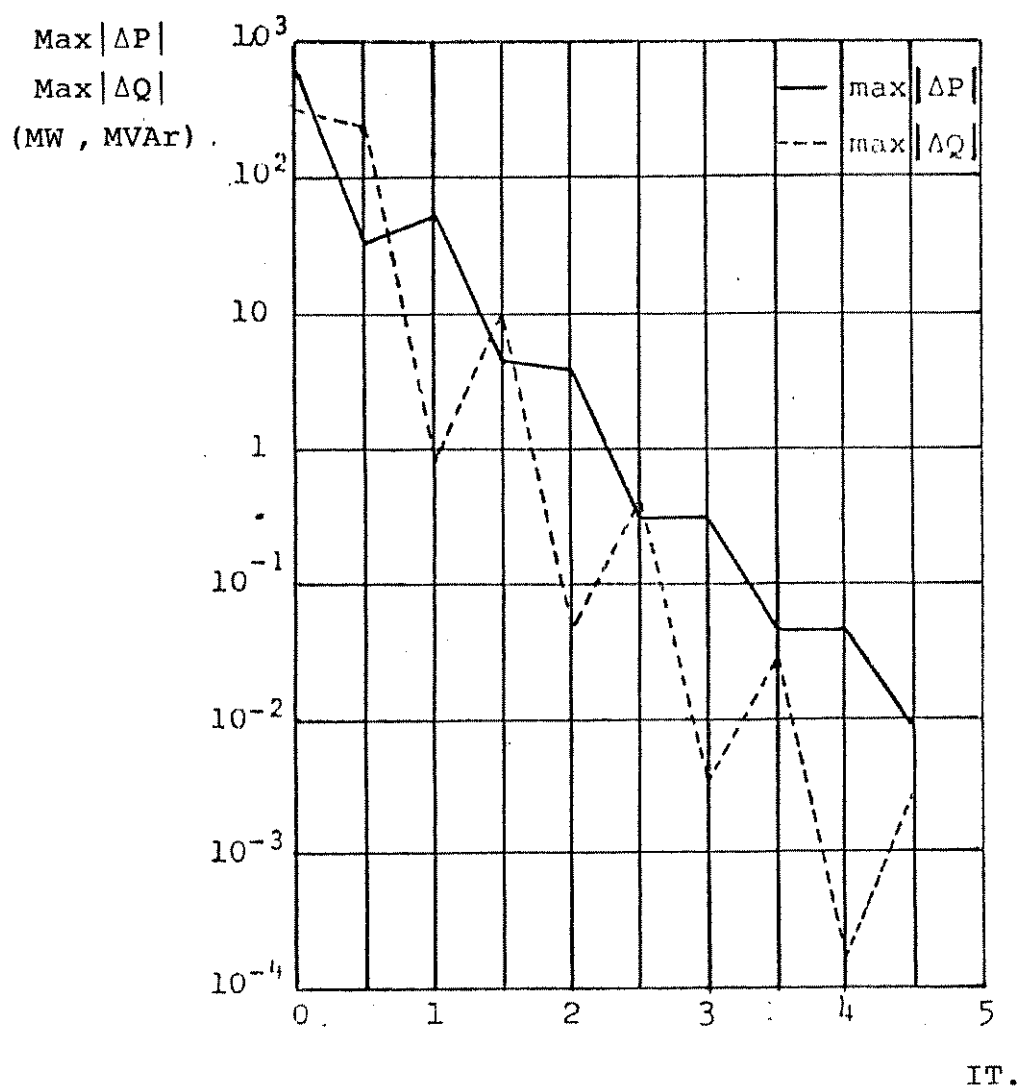


Fig. (4.1): Características de convergência para o sistema IEEE 118, utilizando o método desacoplado rápido reproduzidas da referência [7].

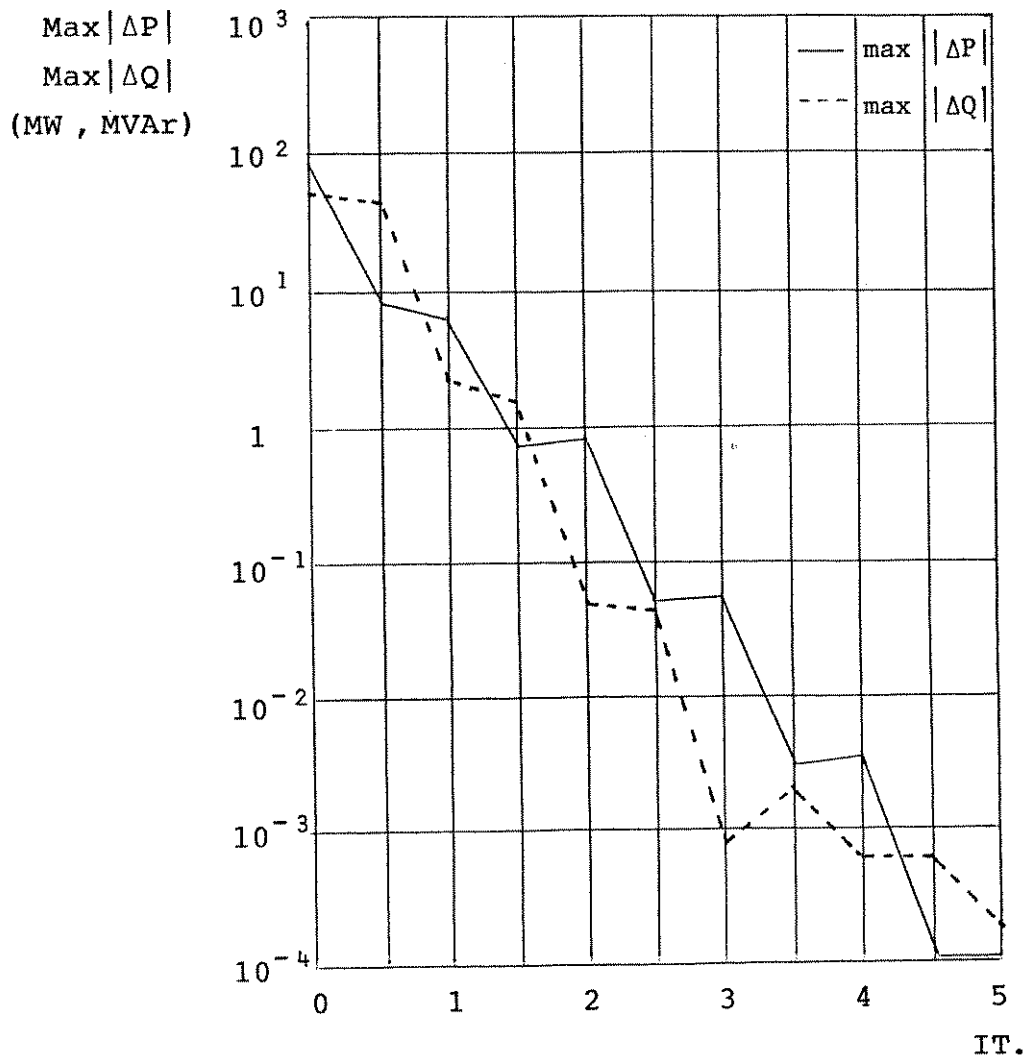


Fig. (4.2): Exemplo de sistema com baixo acoplamento
 (Sistema IEEE 30 alterado; todas as resis_
 tências das linhas iguais a zero).

razões R/X moderadas, como é o da fig. (4.1) se apresentam perturbações mútuas entre os dois sub-problemas, sendo menos pronunciados os efeitos na potência ativa causados pela correção das tensões. Na medida que a razão R/X aumenta (por exemplo, valores maiores que a unidade), as interações entre os dois sub-problemas se intensificam mais, descaracterizando o gráfico (4.1). Tais perturbações dificultam a convergência do método D.R. e indicam a existência do acoplamento entre os sub-problemas P θ e QV que já não é desprezível e deve ser levado em conta.

No método D.R., durante a correção dos ângulos, os módulos das tensões são considerados constantes e durante a correção destes últimos, os seus ângulos são mantidos fixos. No método CRIC ("Constrained Reactive Implicit Coupling"), proposto por Carpentier, durante a meia iteração reativa, a potência ativa é mantida constante no lugar dos ângulos, com o que se restringe o efeito das correções das tensões no equilíbrio ativo do sistema. Com isto, o sub-problema reativo fica menos susceptível a variações nos ângulos e as correções nas tensões são suficientemente conservadoras para não alterar significativamente a potência ativa.

A seguir apresenta-se as idéias básicas nas quais se baseia a metodologia CRIC formulada por Carpentier quando aplicada ao problema de cálculo de fluxo de carga convencional.

4.2 - Princípios do Método CRIC para Fluxo de Carga Convencional [18]

O CRIC se fundamenta em duas idéias básicas, uma teórica e outra de origem prática. A primeira consiste em fixar as injeções de potência ativa durante a meia iteração reativa. A idéia prática consiste em que, quando se está corrigindo os módulos das tensões, o fato de manter fixas as inje-

ções de potência ativa é equivalente a manter constantes os fluxos ativos em cada bipolo do sistema. O erro introduzido é muito pequeno, permitindo estabelecer uma nova matriz L_C para o sub-problema reativo que mantém as características de esparsidade dos métodos desacoplados tradicionais.

4.3 - Desacoplamento Teórico

Considere-se a expressão do Método de N.R. (2.5). Sem perda de generalidade, ela pode ser aplicada ao processo reativo, considerando a restrição $\Delta P^r = 0$. Logo:

$$0 = H\Delta\theta^r + N\Delta V \quad (4.1.a)$$

$$\Delta Q = M\Delta\theta^r + L\Delta V \quad (4.1.b)$$

de (4.1.a) tem-se:

$$\Delta\theta^r = -H^{-1}N\Delta V \quad (4.2)$$

Substituindo em (4.1.b):

$$\Delta Q = (L - MH^{-1}N)\Delta V$$

logo:

$$\Delta Q = L'_C \Delta V \quad (4.3)$$

onde:

$$L'_C = L - MH^{-1}N \quad (4.4)$$

As expressões (4.2) - (4.4) são a base do método CRIC. Em forma algorítmica, ele se resume assim:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P &= P^e - P(V, \theta) \\ \Delta\theta^a &= (H)^{-1}\Delta P \\ \theta &\leftarrow \theta + \Delta\theta^a \end{aligned} \right\} V \text{ constante} \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned}
 \Delta Q &= Q^e - Q(V, \theta) \\
 \Delta V &= (L'_C)^{-1} \Delta Q \\
 V &\leftarrow V + \Delta V \\
 \Delta \theta^r &= -H^{-1} N \Delta V \\
 \theta &\leftarrow \theta + \Delta \theta^r
 \end{aligned}
 \left. \vphantom{\begin{aligned} \Delta Q &= Q^e - Q(V, \theta) \\ \Delta V &= (L'_C)^{-1} \Delta Q \\ V &\leftarrow V + \Delta V \\ \Delta \theta^r &= -H^{-1} N \Delta V \\ \theta &\leftarrow \theta + \Delta \theta^r \end{aligned}} \right\} \begin{array}{l} \\ \\ \\ P \text{ constante} \\ \end{array}
 \tag{4.6}$$

$$\tag{4.7}$$

As expressões obtidas para o CRIC não contêm aproximações, com exceção da inerente linearização do Método de Newton-Raphson.

4.4 - Desacoplamento Prático

O modelo desacoplado teórico deduzido anteriormente gera uma sub-matriz reativa L'_C não esparsa. Este fato é determinante, já que limita severamente a sua aplicação prática. Com o fim de estabelecer uma forma esparsa para L'_C , utiliza-se a idéia prática comentada anteriormente. O erro introduzido é pequeno, devido à característica de esparsidade das redes elétricas práticas.

Numa determinada linha, quando seu fluxo ativo é mantido constante, gera-se uma relação entre as tensões e a abertura angular. Logo, é possível obter uma expressão desta última, que seja só função das tensões.

Considere-se o bipolo k-m da figura (4.3), pertencente a um sistema de n barras. O fluxo de potência ativa no sentido k-m e a injeção de potência reativa no nó K são, respectivamente:

$$P_{km} = g_{km} V_k^2 + V_k V_m Y_{km} \sin(\theta_{km} - \alpha_{km}) \tag{4.8}$$

$$Q_k = -B_{kk} V_k^2 - V_k \sum_{k \neq m} V_m Y_{km} \cos(\theta_{km} - \alpha_{km}) \tag{4.9}$$

Onde Y_{km} e α_{km} são a admitância do bipolo e seu respectivo ângulo de perda (ver apêndice A).

Considerando a hipótese feita anteriormente, o fluxo

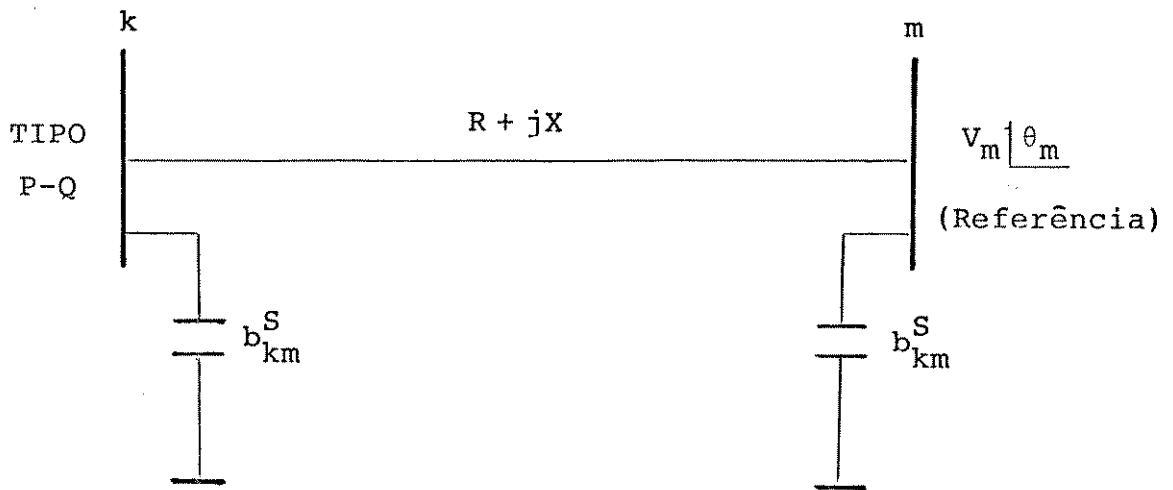


Figura (4.3): Sistema de duas barras.

P_{km} é constante. Logo, (4.8) pode ser reescrita como:

$$A_{km} = V_k^2 \beta_{km} + V_k V_m \sin(\theta_{km} - \alpha_{km}) \quad (4.10)$$

Onde A_{km} e β_{km} são constantes e definidas como:

$$A_{km} = \frac{P_{km}}{Y_{km}} \quad \beta_{km} = \sin \alpha_{km}$$

De (4.10) temos:

$$\sin(\theta_{km} - \alpha_{km}) = \frac{A_{km} - \beta_{km} V_k^2}{V_k V_m} = S_{km}(V) \quad (4.11)$$

Nesta expressão, tem-se a abertura angular em função só das tensões do bipolo. Por outro lado:

$$\begin{aligned}\cos(\theta_{km} - \alpha_{km}) &= \sqrt{1 - \sin^2(\theta_{km} - \alpha_{km})} \\ &= \sqrt{1 - S_{km}^2(V)}\end{aligned}\quad (4.12)$$

Substituindo em (4.9) chega-se a:

$$Q_k = -B_{kk}V_k^2 - V_k \sum_{k \neq m} V_m Y_{km} \sqrt{1 - S_{km}^2(V)} = Q_k(V) \quad (4.13)$$

A expressão (4.13) é exclusivamente função do vetor de tensões. Logo é possível determinar a matriz L_C :

$$L_C = \frac{\partial Q(V)}{\partial V} \quad (4.14)$$

Diferenciando parcialmente, obtêm-se as expressões para o modelo aproximado do CRIC:

$$L_C \left\{ \begin{aligned} L_{kk} &= \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = 2N_k V_k - \sum_{k \neq m} J_{km} \left[\frac{V_m + 2V_k \beta_{km} \sin(\theta_{km} - \alpha_{km})}{\cos(\theta_{km} - \alpha_{km})} \right] \\ L_{km} &= \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} = \frac{-J_{km} V_k}{\cos(\theta_{km} - \alpha_{km})} \quad \text{para } k \neq m \end{aligned} \right. \quad (4.15)$$

Onde, para o caso da figura (4.3), tem-se:

$$N_k = -B_{kk}$$

$$J_{km} = Y_{km}$$

A dedução detalhada e mais geral encontra-se no apêndice A.

As expressões (4.15) são a essência do método CRIC. A nova matriz L_C obtida é esparsa e mantém a estrutura da matriz incidência do sistema. Tal como a matriz L (método de Newton), ela é simétrica em estrutura, mas não em valores.

A correção para os ângulos (4.7) fornecida pelo sub-

problema reativo é pequena comparada com as obtidas no sub-problema ativo, logo pode ser desprezada. Assim, o CRIC pode ser executado no mesmo esquema do Newton Desacoplado:

$$\begin{aligned}
 \Delta P &= P^e - P(V, \theta) \\
 \Delta \theta &= H^{-1} \Delta P \\
 \theta &\leftarrow \Delta \theta + \theta \\
 \Delta Q &= Q^e - Q(V) \\
 \Delta V &= L_C^{-1} \Delta Q \\
 V &\leftarrow \Delta V + V
 \end{aligned}
 \tag{4.16}$$

As implicações da filosofia do CRIC vão além do problema de fluxo de carga, tendo grande importância em fluxo de carga ótimo pela qualidade das sensibilidades obtidas através dele e as vantagens de minimizar o distúrbio ativo durante processos de otimização reativa. Em seguida se realiza uma análise comparativa do CRIC aplicado ao fluxo de carga convencional com o método N.D.

4.5 - Análise Gráfica Comparativa dos Métodos CRIC e Newton Desacoplado

A seguir realiza-se um estudo comparativo do método CRIC e do método Newton Desacoplado (N.D.) com relação ao efeito do acoplamento no sub-problema reativo. O estudo está baseado no sistema de duas barras da figura (4.3), onde os valores de R e X considerados são tais que o módulo da impedância da linha é fixo e igual a 0.8 p.u.

4.5.1 - Efeito da razão R/X no sub-problema reativo

As figuras (4.4) mostram o efeito da razão R/X na potência reativa para os métodos CRIC e Newton Desacoplado respectivamente. O gráfico (4.4.a) foi feito considerando uma

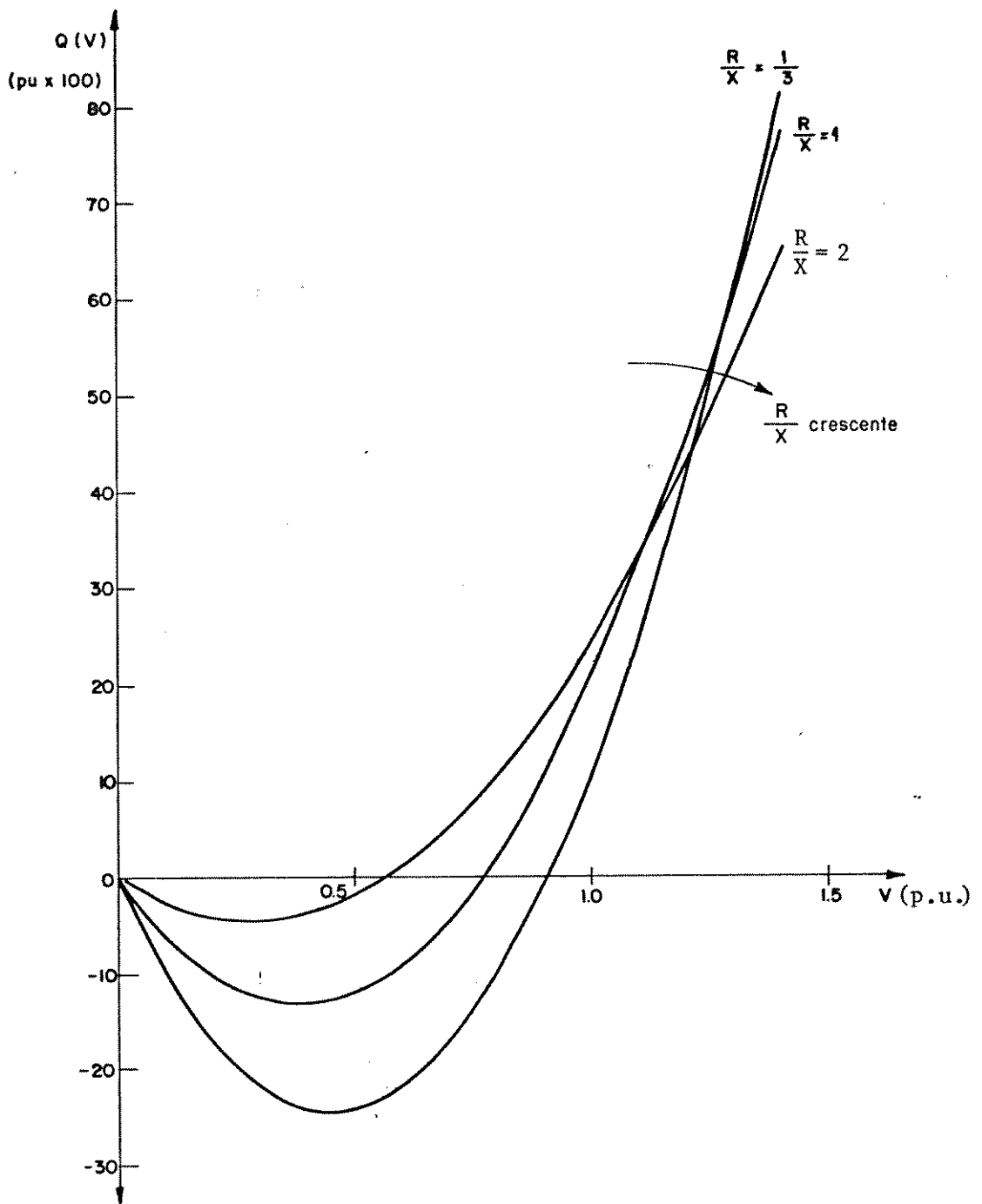


Fig. (4.4.a): Características $Q(V)$ com θ_{km} constante: efeito da razão R/X (Sistema de duas barras); $\theta_{km} = -12^\circ$.

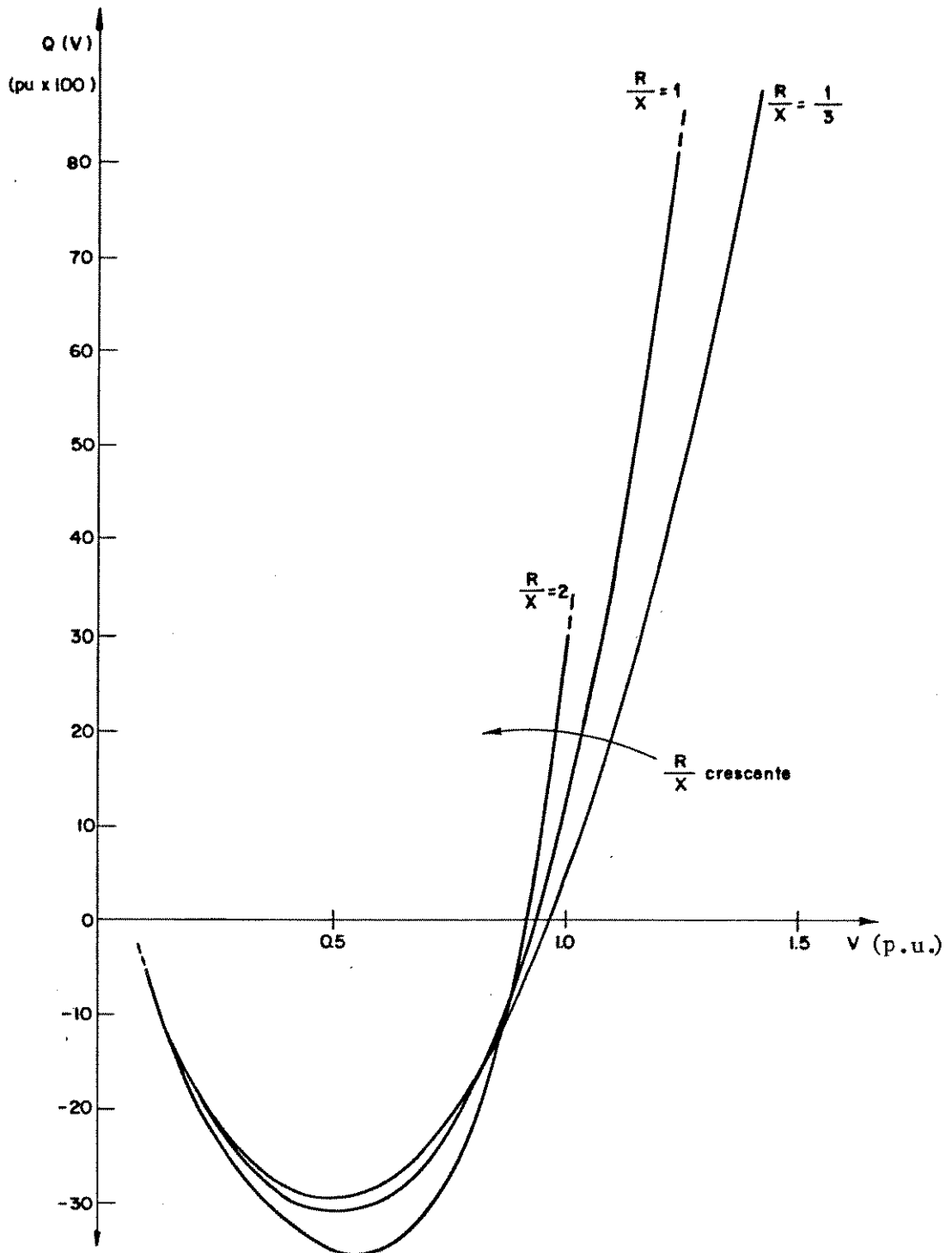


Fig. (4.4.b): Características $Q(V)$ com potência ativa constante: efeito da razão R/X (Sistema de duas barras), $P_{km} = -0.1$ p.u.

abertura angular constante (hipótese do N.D.), enquanto que (4.4.b) foi traçado considerando o fluxo de potência ativa constante (hipótese do CRIC). Pode-se observar que o crescimento da razão R/X tem efeitos contrários para os métodos N.D. e CRIC. No primeiro, à medida que R/X aumenta, as características vão perdendo velocidade de crescimento na região de interesse prático (vizinhança de tensão igual a 1 p.u.) desta forma gerando derivadas numericamente menores. Para o método CRIC o aumento da razão R/X implica que a velocidade de crescimento em Q também aumenta originando conseqüentemente derivadas maiores. As implicâncias destes fatos serão vistas mais adiante.

4.5.2 - Efeito do Carreamento no Sub-problema Reativo

As figuras (4.5) mostram o efeito do aumento do carregamento quando a rede tem uma razão R/X baixa. A figura (4.5.a) apresenta as características da potência reativa parametrizadas na abertura angular do bipolo da figura (4.3). Na figura (4.5.b) tem-se as características da potência reativa parametrizadas em P ; cada um destas últimas representa um subespaço onde o fluxo ativo é constante e os ângulos mudam implicitamente para manter a dita condição. Na região de interesse, ambos gráficos se comportam de maneira muito similar devido ao baixo acoplamento existente neste caso. Note-se que os gráficos de potência reativa para os métodos CRIC e N.D. representam em geral subespaços diferentes, já que as hipóteses que os geraram são também diferentes: nos gráficos com θ constante, a potência ativa muda de maneira a manter essa restrição e nos gráficos com P constante, os ângulos variam visando este objetivo. Elas coincidem em pontos que fornecem soluções onde se satisfazem simultaneamente os valores de θ e P fixados. Porém neste caso particular (R/X baixo), tais características são muito próximas, devido ao baixo acoplamento ativo-reativo, chegando a coincidir plenamente quando o acoplamento é nulo. Isto se verifica melhor nos gráficos (4.6.a) e (4.6.b) onde se ampliou a área de interesse. As característi-

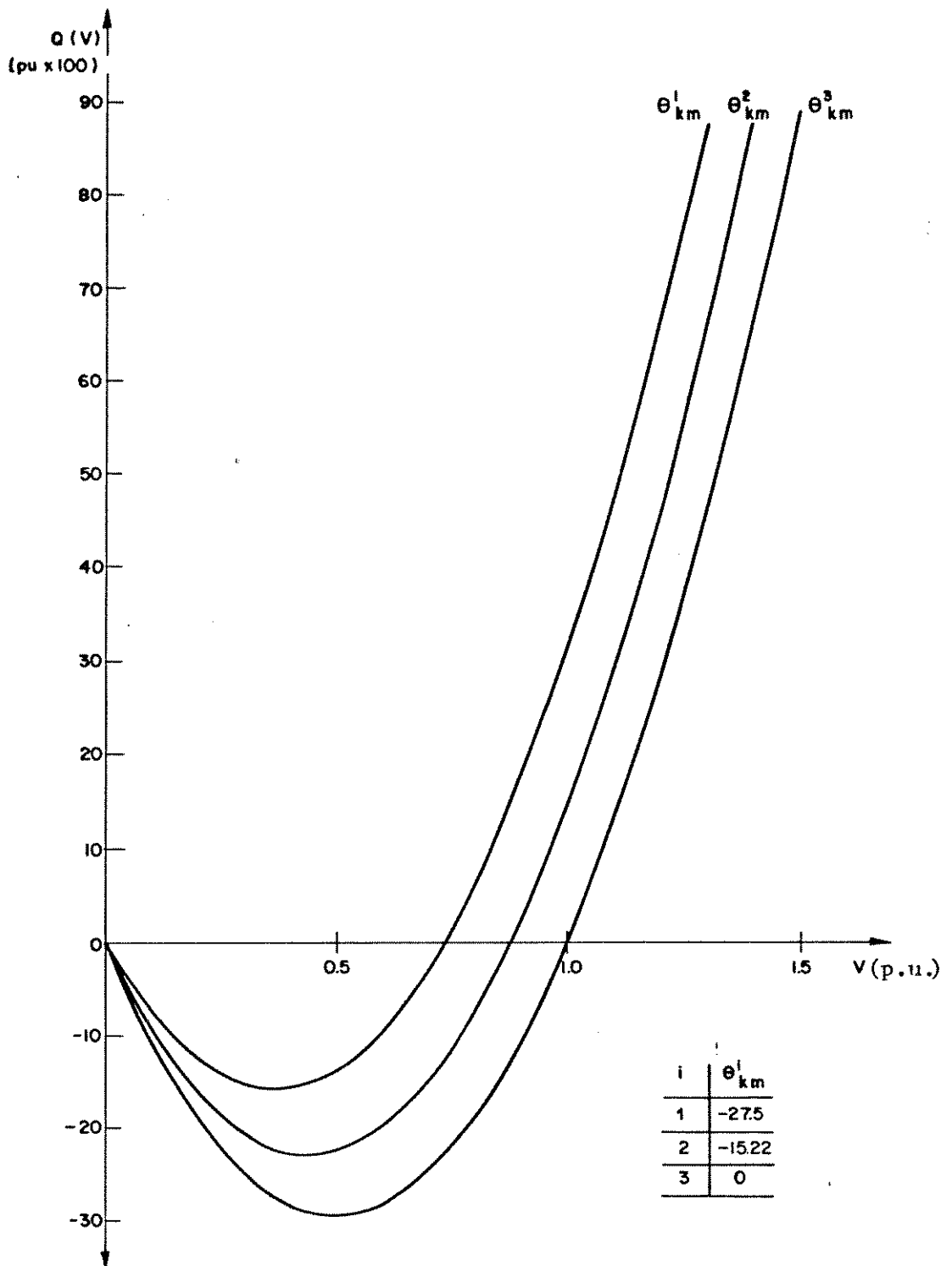


Fig. (4.5.a): Características $Q(V)$ parametrizadas em θ_{km} (Sistema de duas barras). Caso de razão $R/X = 1/3$.

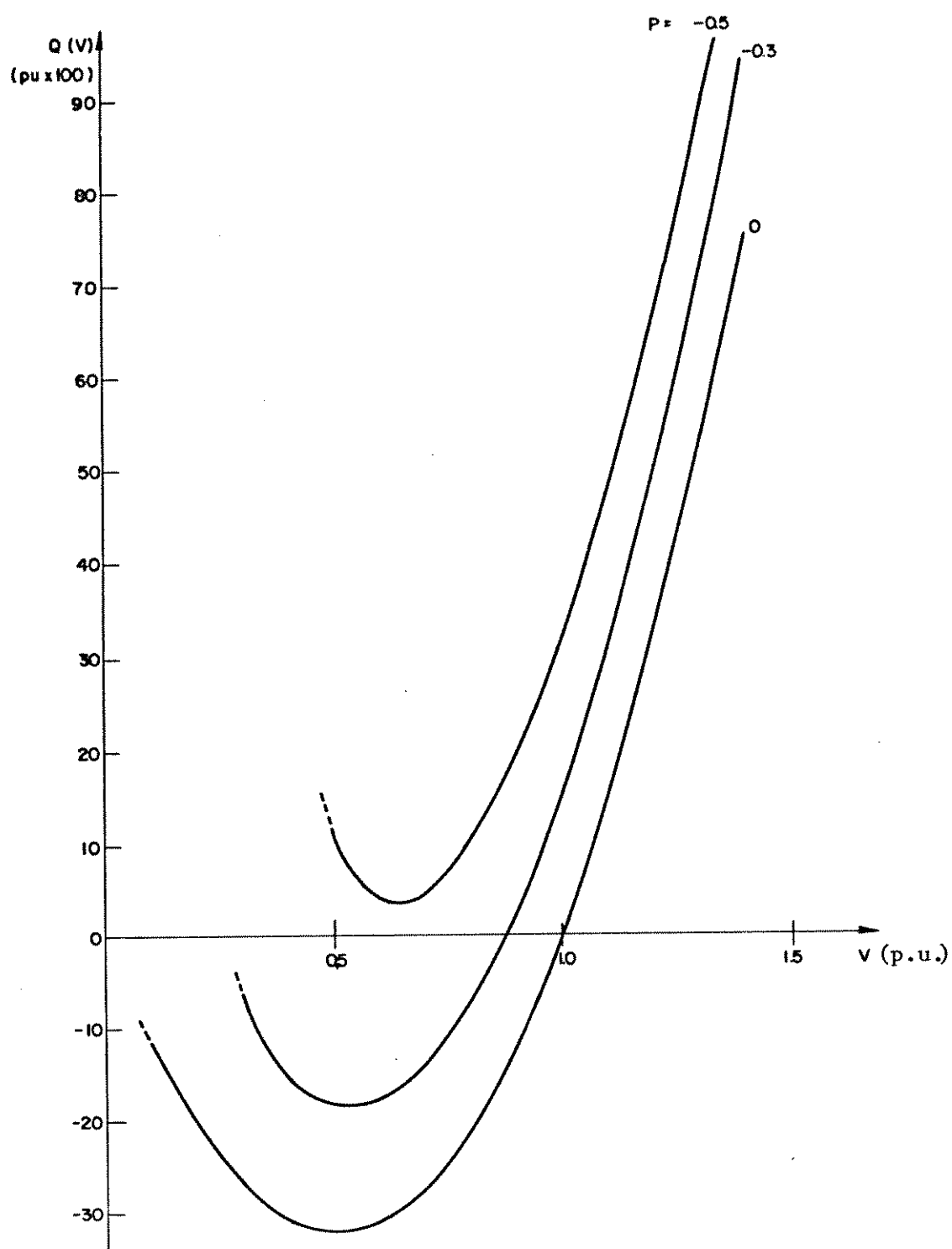


Fig. (4.5.b): Características $Q(V)$ parametrizadas em valores fixos de potência ativa (Sistema de duas barras). Caso da razão $R/X = 1/3$.

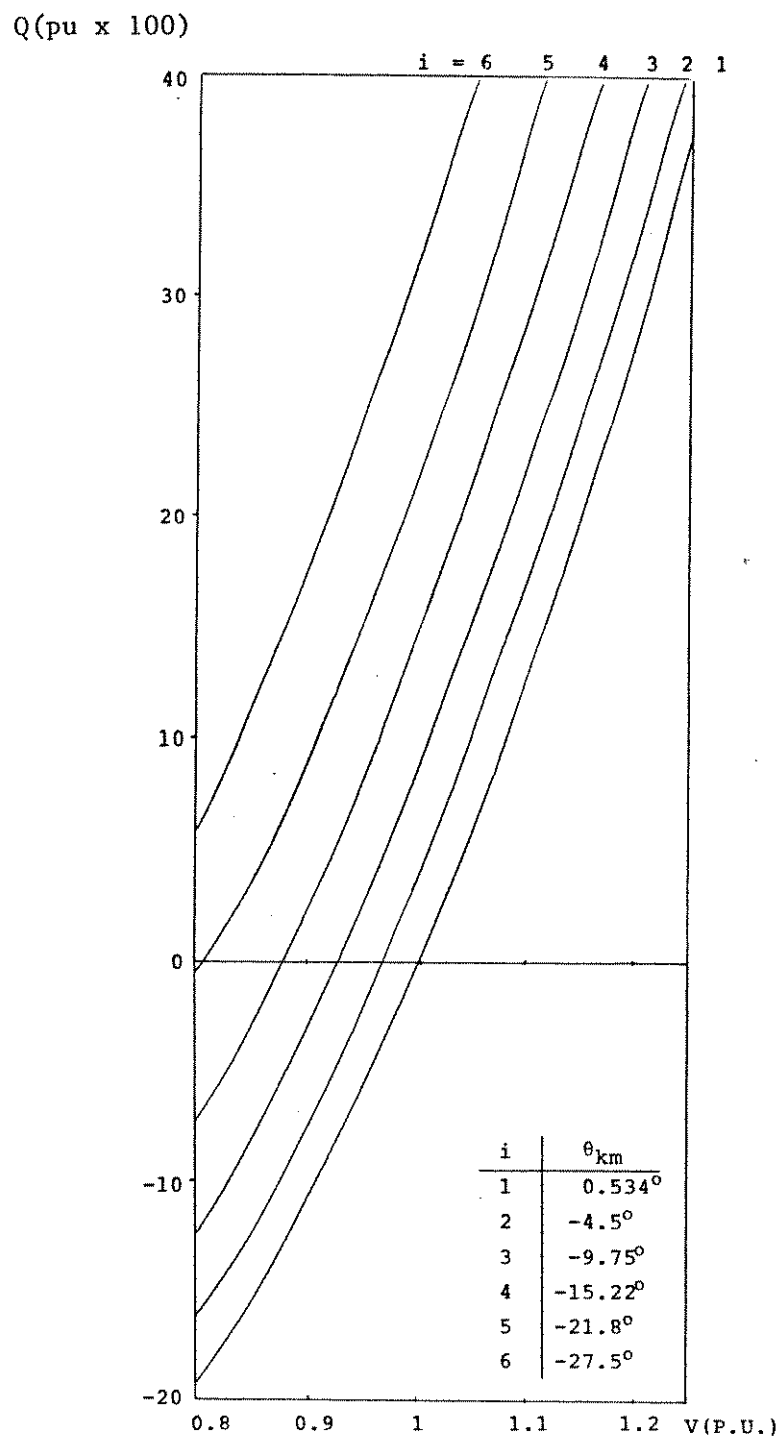


Fig. (4.6.a): Características $Q(V)$ com θ_{km} constante (Sistema de duas barras) com razão $R/X = 1/3$ traçadas em torno ao ponto $V = 0.972$ p.u.

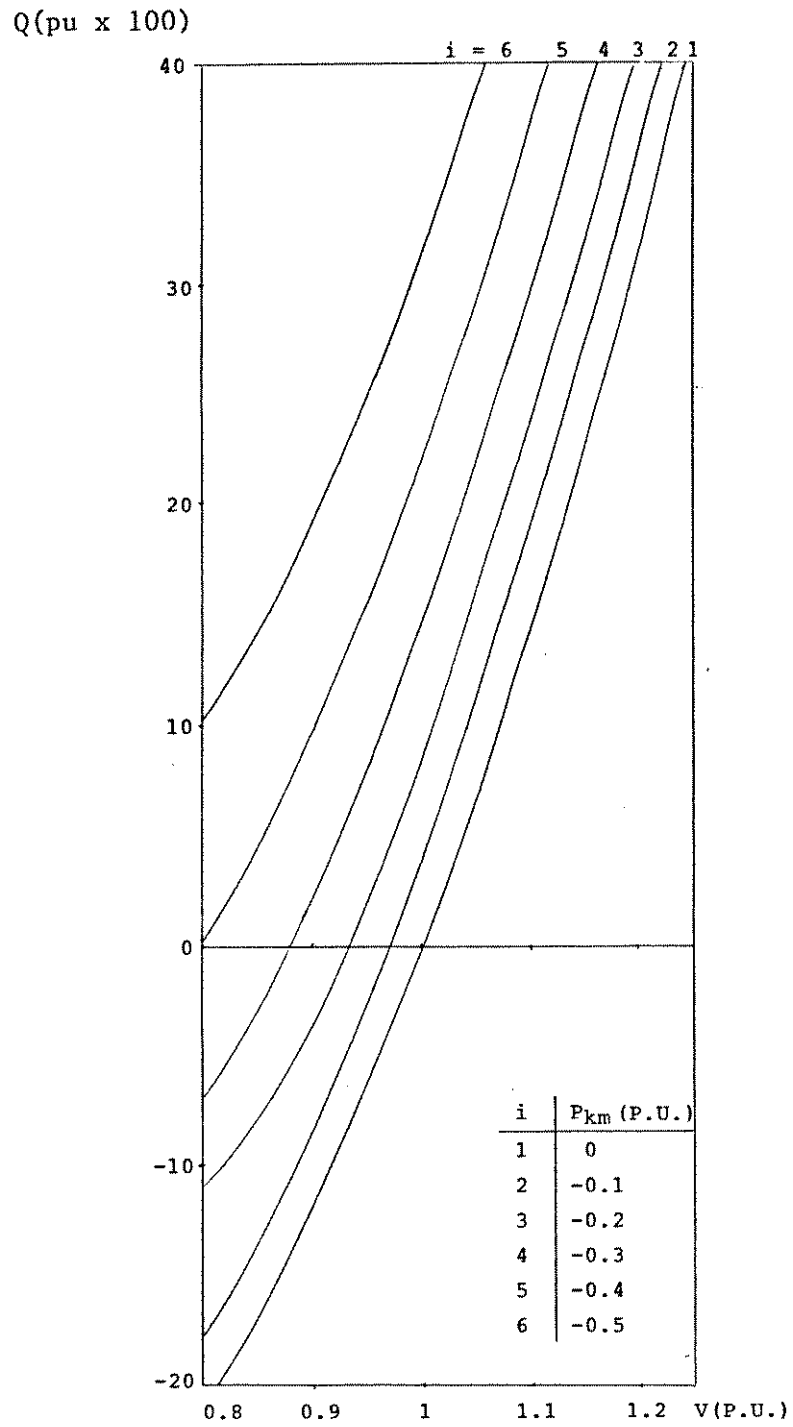


Fig. (4.6.b): Características $Q(V)$ com potência ativa constante (Sistema de duas barras) com razão $R/X = 1/3$ traçadas em torno ao ponto $V = 0.972$ p.u.

cas para os métodos CRIC e N.D. estão muito perto entre elas. Isso leva a obter derivadas L e L_c também muito parecidas. Então em casos como este, onde o acoplamento é baixo, o desempenho dos métodos é similar.

4.5.3 - Situações de acoplamento ativo-reativo não desprezível

As figuras (4.7) mostram as características $Q(v)$ para uma razão R/X alta. Os gráficos foram feitos sobre o ponto de operação para $V = 0.972$ p.u., ou seja, neste valor as características com θ constante e P constante se interceptam.

Suponha que o sistema da figura (4.3) esteja operando no ponto A dos gráficos (4.7.a) e (4.7.b), ou seja, com tensão fasorial $V = V_a | \theta_a$ e com valores de potência $P^e = P_a$, $Q^e = Q_a$. Quando por exemplo uma perturbação $\Delta Q = \Delta Q_a$ acontece, o método N.D. fornece uma correção para a tensão quase três vezes a fornecida pelo método CRIC. As consequências no N.D. são uma forte perturbação na potência ativa, que leva neste caso à divergência já que a meia iteração ativa fornece uma correção angular que reflete essa perturbação gerando então uma realimentação positiva. Por outro lado, a correção para a tensão fornecida pelo método CRIC, é suficientemente conservadora para não perturbar significativamente a potência ativa. Na figura (4.8) mostra-se a evolução da tensão para ambos métodos quando acontece a perturbação ΔQ dos gráficos (4.7). O método N.D. diverge, enquanto o método CRIC converge instantaneamente em uma iteração à nova solução, com uma tolerância de 0.001 p.u.

Resumindo, quando as razões R/X são baixas os desempenhos dos métodos CRIC e N.D. são similares já que o acoplamento ativo-reativo é baixo. Nestes casos uma perturbação na potência reativa só implicará correções na tensão sem influir em θ . Por outro lado, para razões R/X altas (problema acoplado) os desempenhos diferem bastante. Como se viu anteriormente, o efeito do crescimento de R/X nas inclinações

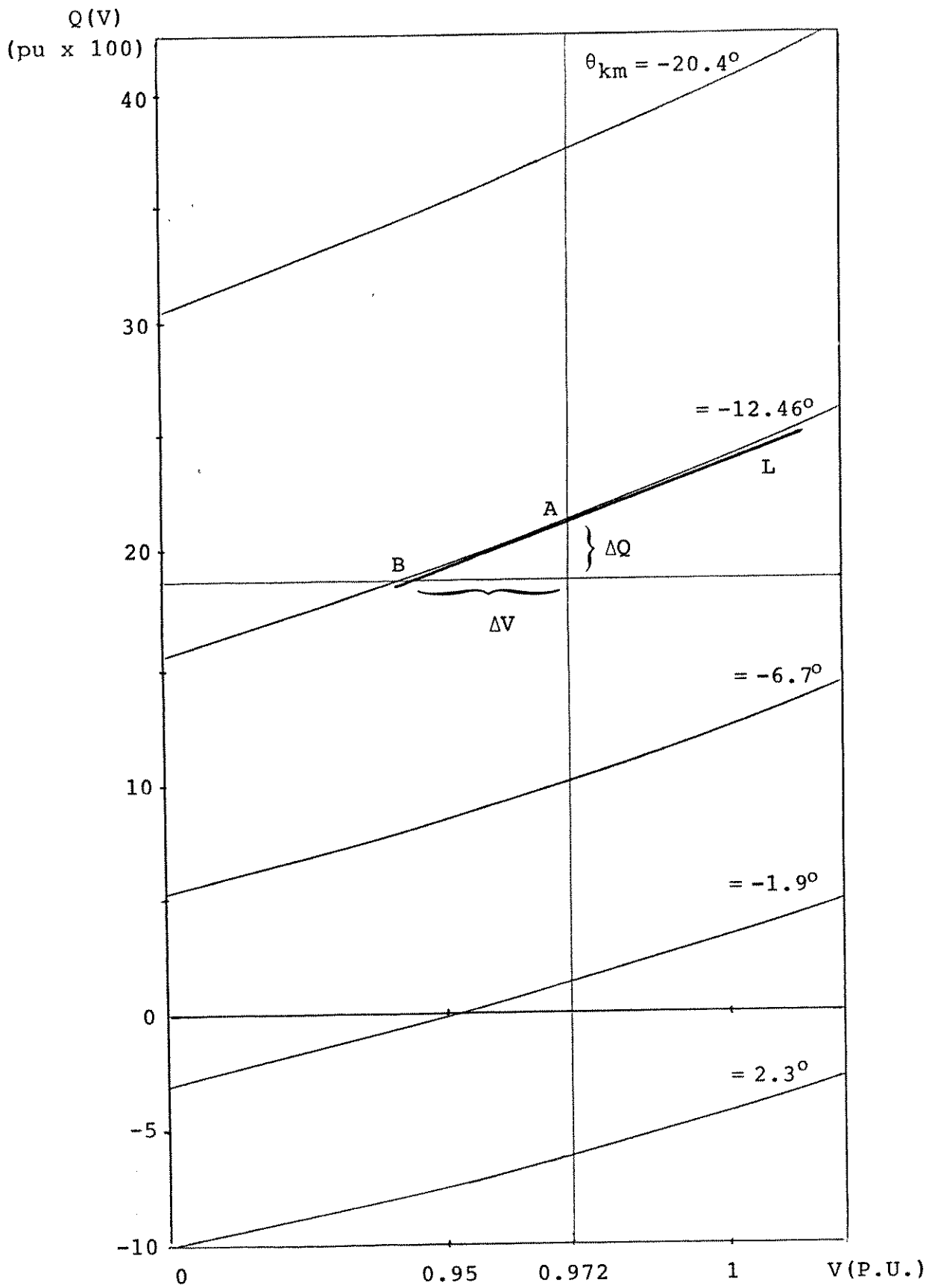


Fig. (4.7.a): Características $Q(V)$ com θ_{km} constante (Sistema de duas barras) com razão $R/X = 1.5$ traçadas em torno do ponto.

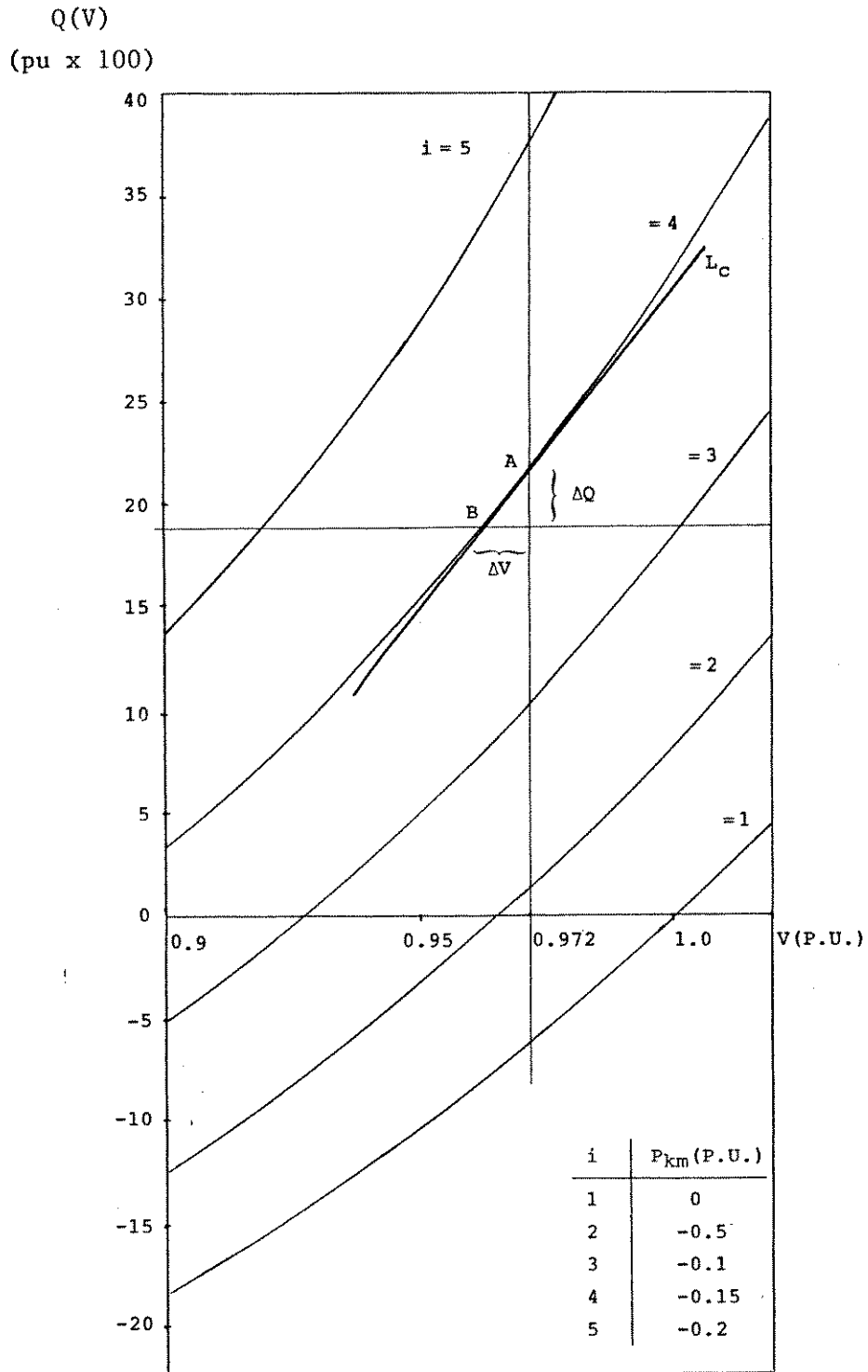


Fig. (4.7.b): Características $Q(V)$ com potência ativa constante (Sistema de duas barras) com razão $R/X=1.5$ traçadas em torno do ponto $V=0.972$ p.u.

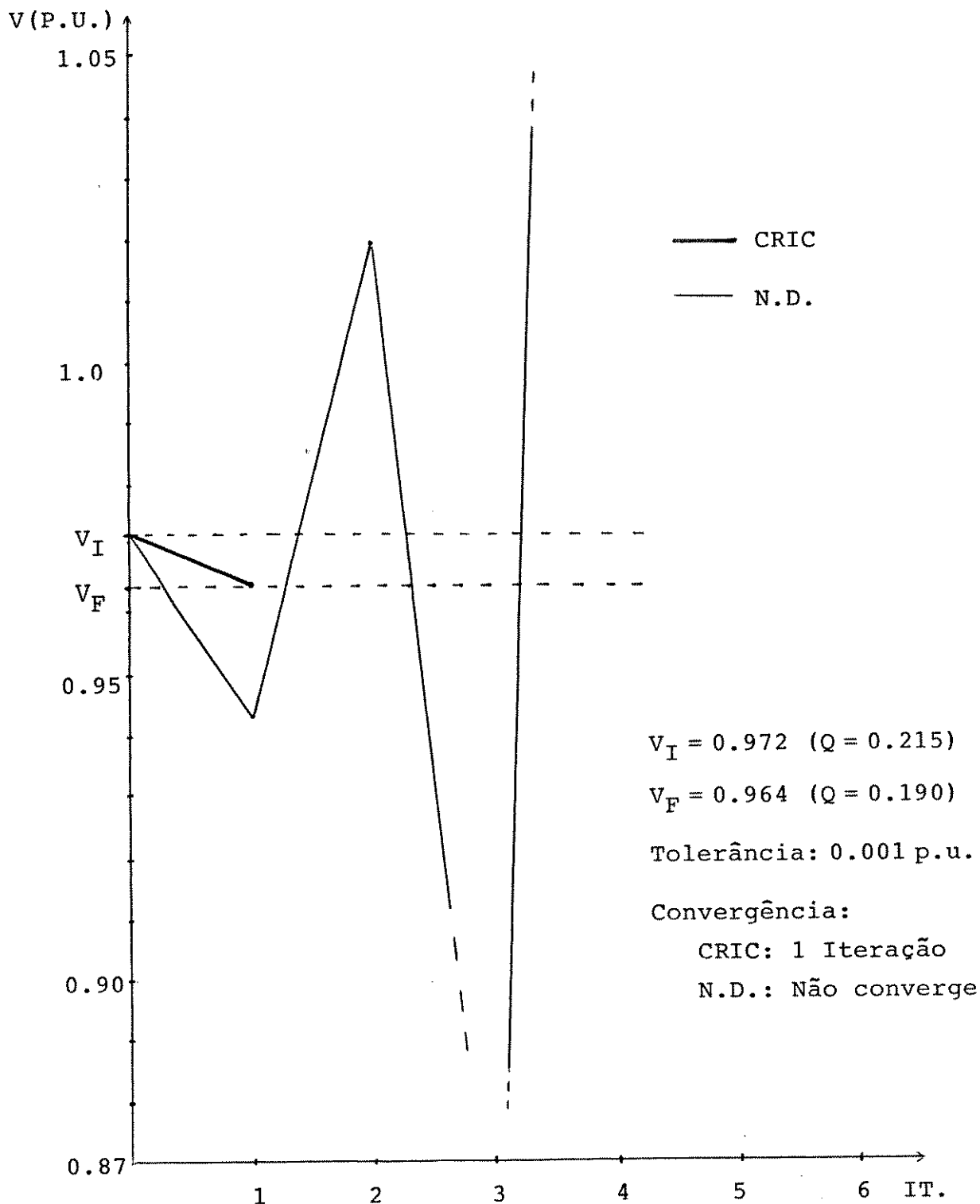


Fig.(4.8): Evolução da tensão após uma perturbação $\Delta Q = 11.6\%$ no sub-problema reativo ($R/X = 1.5$, solução inicial $V = 0.972$ $\underline{-12.46^\circ}$, solução final $V = 0.964$ $\underline{11.55^\circ}$).

nos gráficos (4.4.a) e (4.4.b) é contrário, causando valores de derivadas cada vez maiores no método CRIC e cada vez menores no método N.D. Assim uma perturbação na potência reativa implicará correções em V e também em θ , já que agora o acoplamento ativo-reativo não é desprezível. O método N.D., pela sua natureza, supõe que o processo ainda é desacoplado e que o efeito da perturbação em Q atinge apenas a tensão; então gera uma correção para V que produzirá uma forte perturbação fazendo demorar a convergência, ou até mesmo divergir, como no caso da figura (4.8). O método CRIC age de uma maneira adaptativa segundo o grau de acoplamento. Assim, ele reconhece que parte do problema deve ser resolvido mediante correção em θ , e portanto fornece uma correção em V menor (mais conservadora).

4.5.4 - Comentários sobre a linearização no método CRIC

Em fluxo de carga, quando se usa o método CRIC o esquema de resolução é o mesmo do método N.D. Na prática, a diferença está apenas nos elementos da matriz L , agora L_C , que foram calculados com a hipótese dos fluxos de potência ativa constantes. Em outras palavras o sub-problema reativo que se resolve continua o mesmo da figura (4.5.a) (ou seja, corrigindo a tensão, mantendo θ fixo), sem ter melhorado a sua não linearidade. Aliás os gráficos (4.7) tampouco indicam que a função $Q(v)$ com P constante seja mais linear que a original ($Q(v)$ com θ constante). O método CRIC calcula as derivadas das características com P constante no ponto equivalente e as aplica ao problema da figura (4.5.a), que em termos práticos não constitui uma melhora na linearização do problema original, mas sim a utilização de uma derivada mais conservadora.

4.6 - Características $Q(v)$ com Potência Ativa Constante: Limites Físicos

Observa-se na figura (4.5.b) que as características

$Q(V)$ com potência ativa constante existem numa região limitada, que se restringe mais à medida que o carregamento cresce, enquanto que as características $Q(V)$ com constante são aparentemente contínuas. Neste sentido, deve-se lembrar o comentado anteriormente com relação a estes gráficos: eles em geral não representam os mesmos pontos de operação (apenas quando elas se interceptam); aliás nos gráficos com P constante existem pontos não representados nos gráficos com θ constante. O observado na figura (4.5.b) tem justificção física e analítica, que é derivável de (4.11). Nessa expressão é necessário que:

$$| S_{km}(v) | \leq 1 \quad (4.17)$$

O domínio da função $Q(v)$ da fig. (4.5.b) está limitado pela restrição (4.17). Isto indica que fora desses limites não é possível atender a condição de potência ativa constante, já que devido aos níveis de tensão nesses pontos, o argumento requerido em (4.11) ultrapassa os $\pm 90^\circ$. Então esta situação simplesmente representa uma impossibilidade física do sistema e não uma restrição do método CRIC.

Nas figuras (4.9) encontram-se as matrizes L (Newton De sacoplado) e L_C (CRIC) em função da razão R/X para o caso do bipolo da figura (4.3). A matriz L_C apresenta pontos singulares definidos pela anulação do seu denominador:

$$\cos(\theta_{km} - \alpha_{km}) = 0 \quad (4.18)$$

Para que não aconteça (4.18) deve-se satisfazer:

$$|\theta_{km} - \text{tg}^{-1} R/X| < 90^\circ \quad (4.19)$$

que é outra maneira de expressar a condição (4.17) e de representar o limite físico do sistema para manter a condição de potência ativa constante.

Em geral as condições operacionais dos sistemas práticos

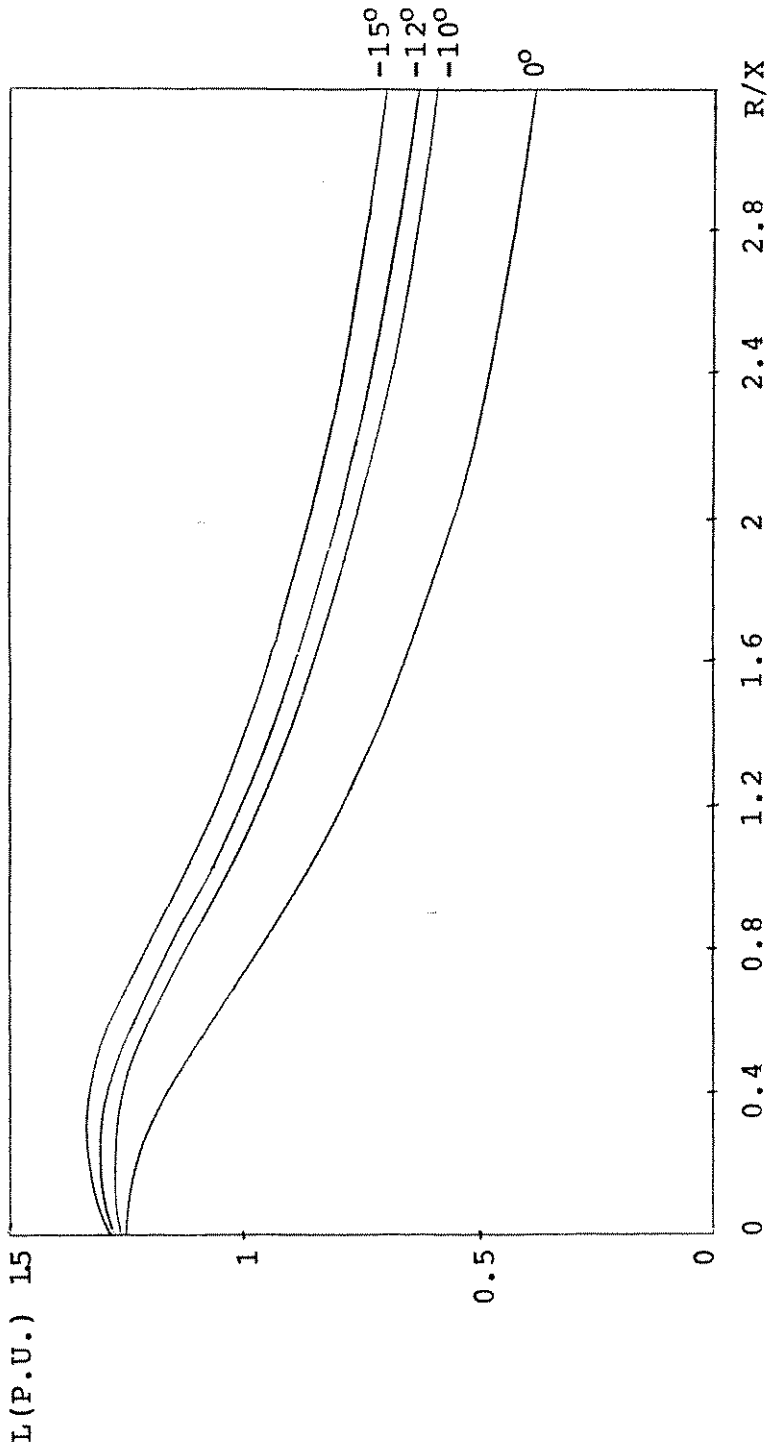


Fig. (4.9.a): Matriz L (método Newton desacoplado) em função da razão R/X e parametrizada em θ_{km} (Sistema de duas barras).

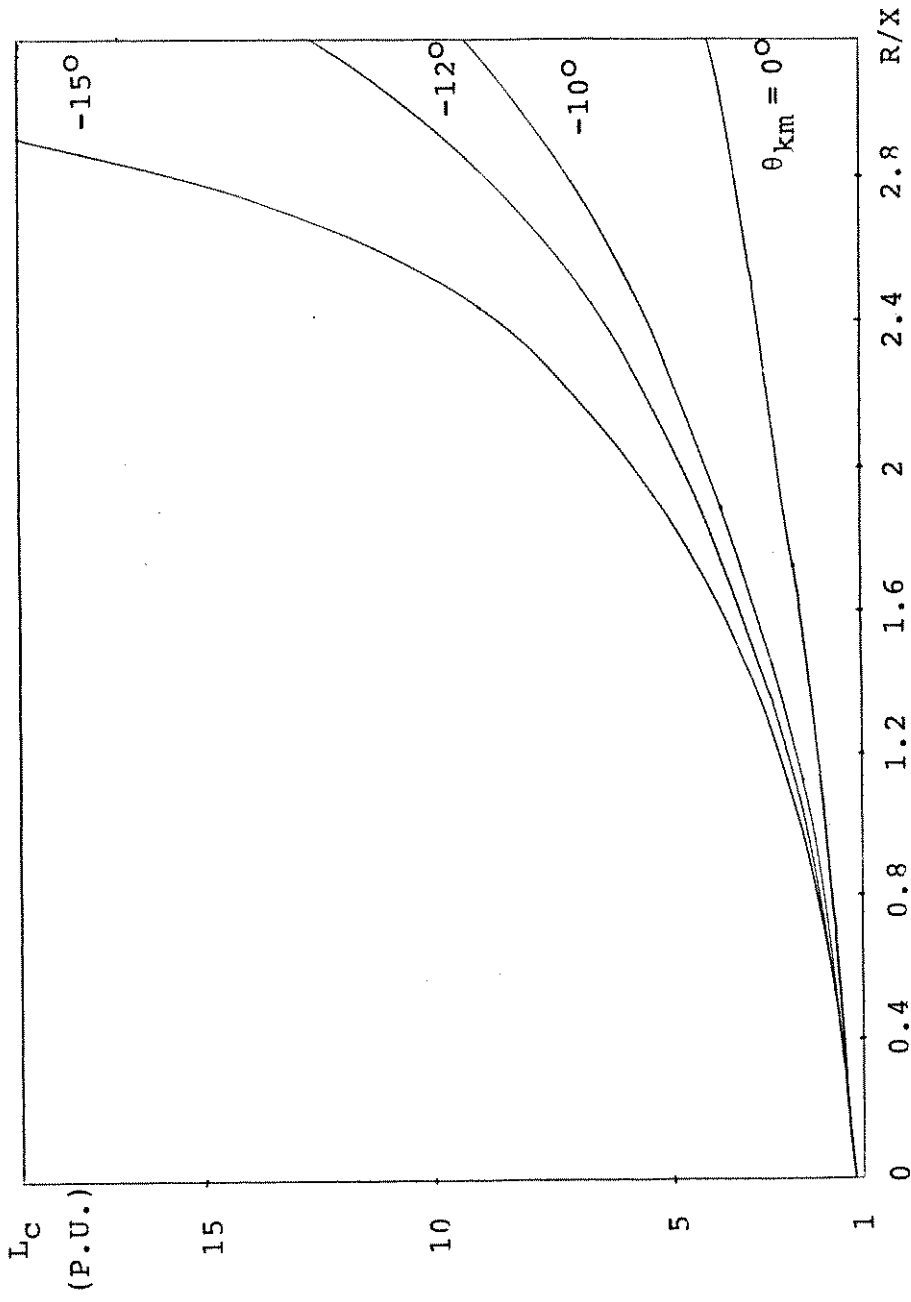


Fig. (4.9.b): Matriz L_C (método CRIC) em função da razão R/X e parametrizada em θ_{km} (Sistema de duas barras).

cos fazem com que eles satisfaçam folgadoamente (4.19). Por exemplo redes de baixa tensão, que apresentam valores de R/X elevados, operam com aberturas angulares muito pequenas.

4.7 - Teste de Desempenho dos Métodos CRIC e Newton Desacoplado

A seguir mostram-se os testes de desempenho para o modelo teórico do CRIC (CRIC exato), o modelo prático chamado aqui simplesmente CRIC, e o método N.D. para a rede de duas barras da figura (4.3).

Considerando-se uma razão R/X de 0.2, gerou-se os gráficos de convergência para o sub-problema ativo da figura (4.10.a), onde fica evidente que o problema é fracamente acoplado, já que durante a meia iteração reativa a potência ativa não é alterada significativamente. Assim, as características de convergência dos métodos CRIC e N.D. praticamente coincidem.

A seguir, supondo $R/X = 2$, gerou-se o gráfico (4.10.b). Aí é evidente o acoplamento ativo-reativo. Enquanto que o método CRIC teórico mantém a característica escalonada mostrando um processo praticamente desacoplado, o método N.D. apresenta-se fortemente instável. Contudo, é importante notar que o CRIC aproximado apresenta muito menos distúrbio ativo com relação ao método N.D. Isto é suficiente para assegurar uma convergência rápida e de muito baixo custo comparado com o CRIC teórico.

Testes com carregamentos diferentes e em redes maiores são incluídos no próximo capítulo.

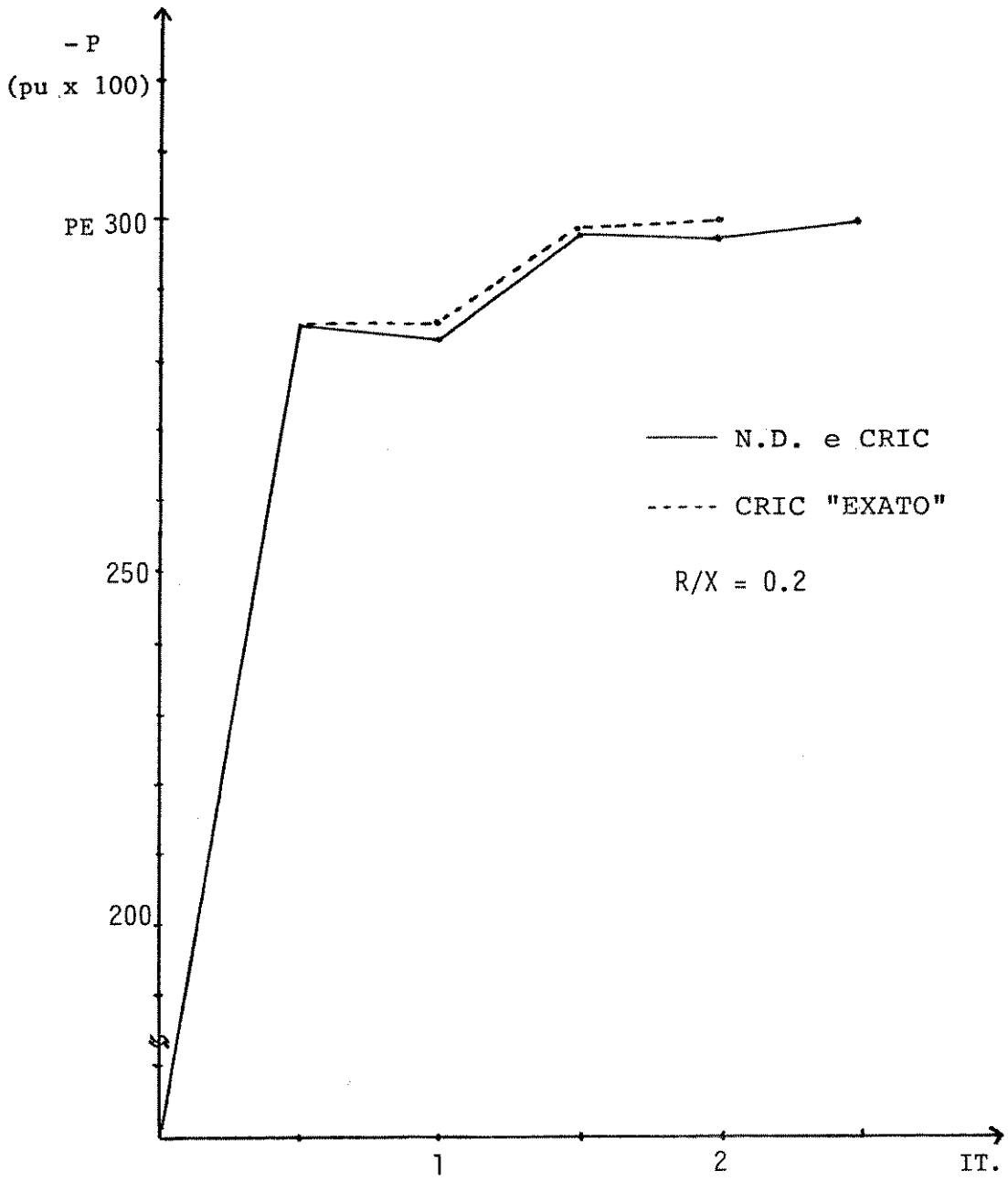


Fig.(4.10.a): Característica de convergência do sub-problema ativo, sistema de duas barras, razão $R/X = 0.2$, tolerância 0.001 p.u.

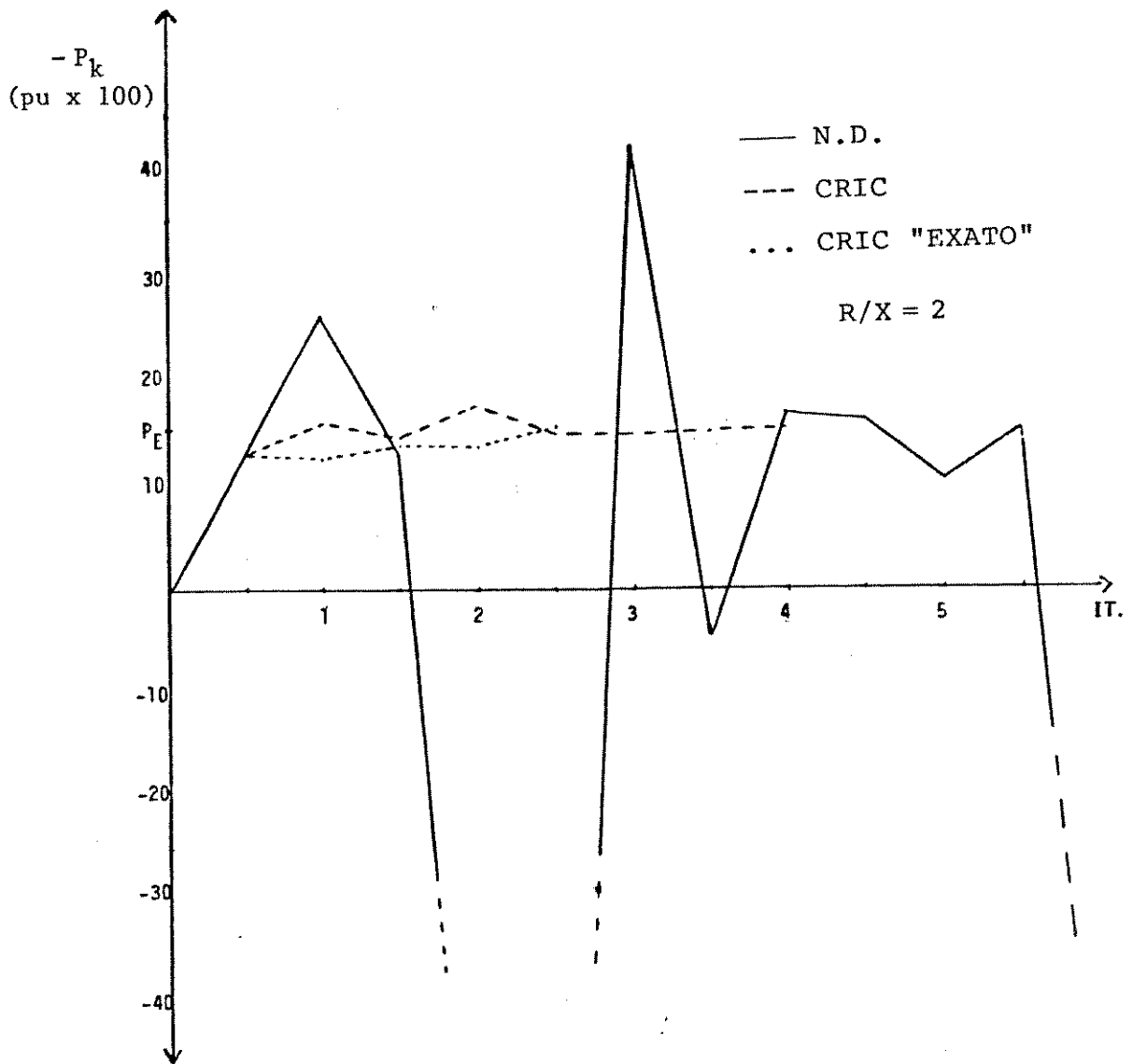


Fig. (4.10.b): Característica de convergência do sub-problema ativo, sistema de duas barras, razão $R/X = 2$, tolerância 0.001 p.u.

4.8 - CRIC: Modelo Constante

Como foi comentado anteriormente, os níveis de tensão e de potência de operação tem uma relação mais ou menos padrão com os parâmetros em redes reais, ou seja, a razão R/X decrece quando vai de sistemas de distribuição para sistemas de subtransmissão, transmissão, etc. Isto permite tirar vantagens de modelos mais simplificados para fluxo de carga.

Em geral, as redes elétricas com razões R/X altas operam com aberturas angulares pequenas, que nos casos de sistemas de distribuição são tipicamente menores que dois graus. Também nestas redes as tensões são mantidas em valores próximos a 1 p.u. o que sugere a seguinte hipótese simplificadora:

$$\begin{aligned} V_k &\cong 1 \text{ p.u.} \\ \theta_{km} &\cong 0^\circ \end{aligned} \tag{4.20.a}$$

Em redes de transmissão de A.T. ($R \ll X$), as tensões também são próximas de 1 p.u.. Além disso, são válidas as mesmas aproximações (i) e (ii) da seção (3.4), ou seja:

$$\begin{aligned} \cos \theta_{km} &\cong 1 \\ B_{km} &\gg G_{km} \text{ sen} \theta_{km} \end{aligned} \tag{4.20.b}$$

e:

$$V_k \cong 1 \text{ p.u.}$$

As aproximações utilizadas para A.T. e B.T., apesar de serem sutilmente diferentes (em A.T. a aproximação enfatiza o fato que a razão R/X é baixa, enquanto que em B.T. baseia-se em θ_{km} pequeno), quando aplicadas independentemente às equações do método CRIC o resultado obtido é o mesmo. Assim, introduzindo-se tais aproximações na matriz H' obtém-se:

$$H'_{kk} \cong \sum_{k \neq m} B_{km}$$

$$H_{km}^i \cong - B_{km} \quad (4.21)$$

onde B_{kk} e B_{km} são elementos diagonal e não diagonal respectivamente, da matriz susceptância da rede.

De maneira análoga, introduzindo-se as aproximações (4.20) na matriz L_C , obtém-se:

$$L_C \text{ k-k} \cong - 2 BSH_k + \sum_{k \neq m} 1/X_{km} \quad (4.22)$$

$$L_C \text{ k-m} \cong - 1/X_{km}$$

onde BSH_k é a soma de todas as susceptâncias shunt ligadas à barra k , e X_{km} é a reatância série da linha ou transformador k - m .

As expressões (4.21) e (4.22) são as equações da versão constante do método CRIC. Denominando-as como B_1 e B_2 , respectivamente, e substituindo-se nas expressões do método D.R., o modelo constante fica:

$\Delta P/V = B_1 \Delta \theta$ $\Delta Q/V = B_2 \Delta V$
--

(4.23)

com:

$$(B_1)_{k-k} = \sum_{k \neq m} B_{km}$$

$$(B_1)_{k-m} = - B_{km}$$

$$(B_2)_{k-k} = - 2 BSH_k + \sum_{k \neq m} 1/X_{km}$$

$$(B_2)_{k-m} = - 1/X_{km}$$

onde:

B_{kk}, B_{km} são elementos da matriz susceptância da rede;

B_{SH}_k é a soma dos shunt ligados à barra k (shunt de linhas e externos);

X_{km} reatância da linha $k-m$ da rede.

A obtenção de (4.23) foi feita a partir da aplicação ao modelo variável do CRIC das hipóteses (4.20). Isto equivale a obter o CRIC particularizado para o caso de fluxos de potência ativa (mantidos, por hipótese, constantes) no valor zero, ou seja, a característica $P=0$ da figura (4.5.b).

O modelo constante é insensível à restrição (4.19) e tem um desempenho melhor e mais robusto que o CRIC em sistemas de grande porte, em especial para razões R/X elevadas, tendo um espectro de validade maior. Novamente, como no capítulo anterior, foi obtido um método aproximado (na prática a linearização foi piorada) que, no entanto, tem desempenho muito melhor.

4.9 - Discussão sobre os Modelos Constantes

A seguir estão resumidos alguns tópicos que apareceram em discussões precedentes:

- Stott e Alsac, na dedução das matrizes do método D.R. aplicaram hipóteses que levaram a um método matematicamente aproximado, porém na prática muito eficiente.
- Comentou-se anteriormente que o método CRIC fornece uma derivada para o sub-problema Q-V que não é a verdadeira. Novamente está se introduzindo "inexatidão" ao método.
- Na determinação do modelo constante para o CRIC novamente se utilizam hipóteses simplificadoras que levam a obter um modelo "inexato" do original.

Em todos estes casos dois elementos comuns : a diminuição da qualidade da linearização, e o fato de deixar um dos

sub-problemas mais conservador (lento) em relação ao outro. De fato, se no método D.R. não se despreza a resistência em B', os dois sub-problemas ficam muito rápidos, causando convergência instável ou divergência. Por outro lado se se despreza a resistência em B' e B", o processo fica proibitivamente lento.

Na medida que as derivadas usadas sejam mais próximas das exatas tem-se uma sequência de correções em θ e V grandes. Isto é adequado quando a aplicação satisfaz as hipóteses de desacoplamento, caso contrário a convergência é difícil e oscilatória. Então, em fluxo de carga convencional, o fato de "piorar" a qualidade das derivadas com relação aos valores exatos (no sentido de substituí-los por valores maiores) é benéfico já que torna o processo mais confiável. Se além disto se aumenta uma sintonização entre os sub-problemas, deixando um deles mais lento (ou passivo), obtém-se um processo robusto e rápido.

Qual deve ser o sub-problema lento?

De uma maneira empírica Stott e Alsac chegaram a escolha de deixar o sub-problema P- θ mais lento no método D.R., ao desprezar a resistência em B'. No CRIC-constante o sub-problema Q-V é deixado mais lento, mas na determinação de B2 se utilizaram hipóteses que não desprezam explicitamente a resistência, tendo então mais consistência teórica.

O fato de deixar o sub-problema Q-V mais conservador e assim gerar correções para os módulos das tensões menores é benéfico pelos seguintes motivos:

- O sub-problema reativo é mais não-linear e portanto mais susceptível a variações.
- A solução para a tensão é perto de 1 p.u.; correções muito grandes vão causar oscilações na convergência de V e de todo o processo. Este último se intensifica com o aumento da razão R/X.

Estas razões são confirmadas pela prática: o CRIC-constante resolve tão efetivamente como o método D.R. os problemas com razões R/X baixas (que são frequentes), e também casos de razões R/X elevadas onde o D.R. tem convergência difícil.

Para observar melhor o modelo CRIC-constante proposto aqui, uma vez mais considere-se a rede da figura (4.3). Nas figuras (4.11) e (4.12) mostra-se as inclinações iniciais para os sub-problemas ativo e reativo respectivamente. Nesses gráficos foram incluídos os casos $R/X=0$, e $R/X=2$. No gráfico (4.11) a aproximação $1/X$ (B' clássico) se apresenta adequada para razões R/X baixas, já que nessa faixa as inclinações iniciais não se diferenciam apreciavelmente, ainda quando a tensão é baixa. Por outro lado, se R/X é alta a diferença é notável; ali só $-B$ dá a inclinação inicial correta.

No gráfico (4.12) pode-se observar que a derivada L_C constante ($1/X$), fornece um valor alto com relação a B'' , causando menos distúrbio na potência ativa. Isto, simplesmente é feito por correções de V mais conservadoras (mais pequenas). O método D.R. (B'') segue a inclinação inicial da derivada de um problema que tornou-se mais não linear com o aumento de R/X . As consequências são correções grandes para a tensão, o que constitui em outras palavras, um comportamento "otimista" deste método, já que está supondo que o processo tem os seus problemas ativo e reativo desacoplados entre eles.

Isto pode-se observar claramente nos gráficos de convergência de P e Q nas figuras (4.13) e (4.14) respectivamente. A estabilidade da versão CRIC-CTE proposta é excelente, convergindo na metade de tempo que o D.R.

Outra propriedade do modelo constante proposto, é que ele mantém bom desempenho na faixa R/X baixa, enquanto que a maioria dos métodos para tratamento de razões R/X elevadas se apresenta menos eficiente nesses casos. Em outras palavras o seu espectro de validade cobre satisfatoriamente a gama dos sistemas práticos. Testes de desempenho do modelo são incluídos no próximo capítulo.

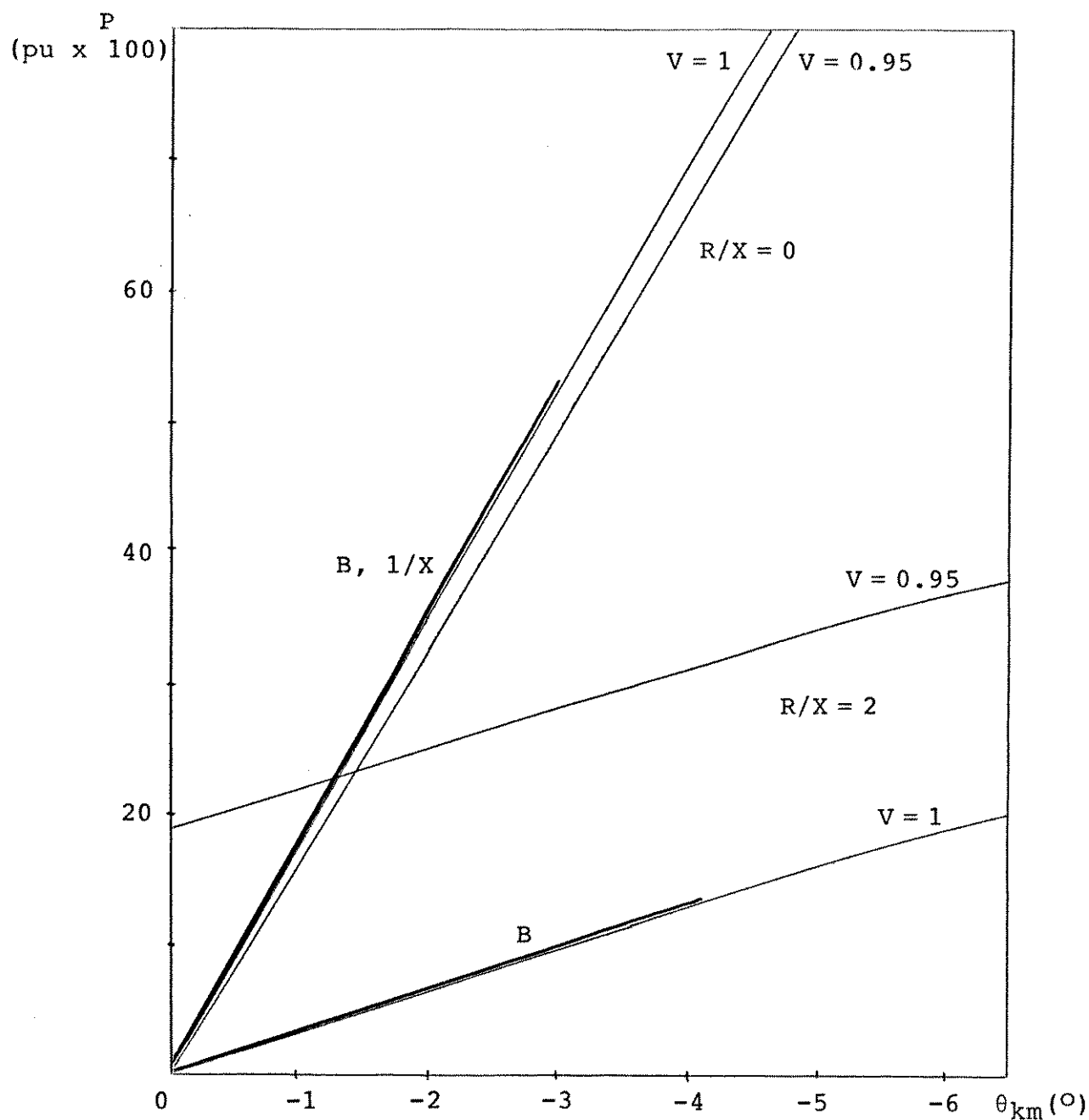


Fig. (4.11): Inclinações iniciais no sub-problema ativo. Características parametrizadas em V (Sistema de duas barras); Casos de razões $R/X=0$ e $R/X=2$.

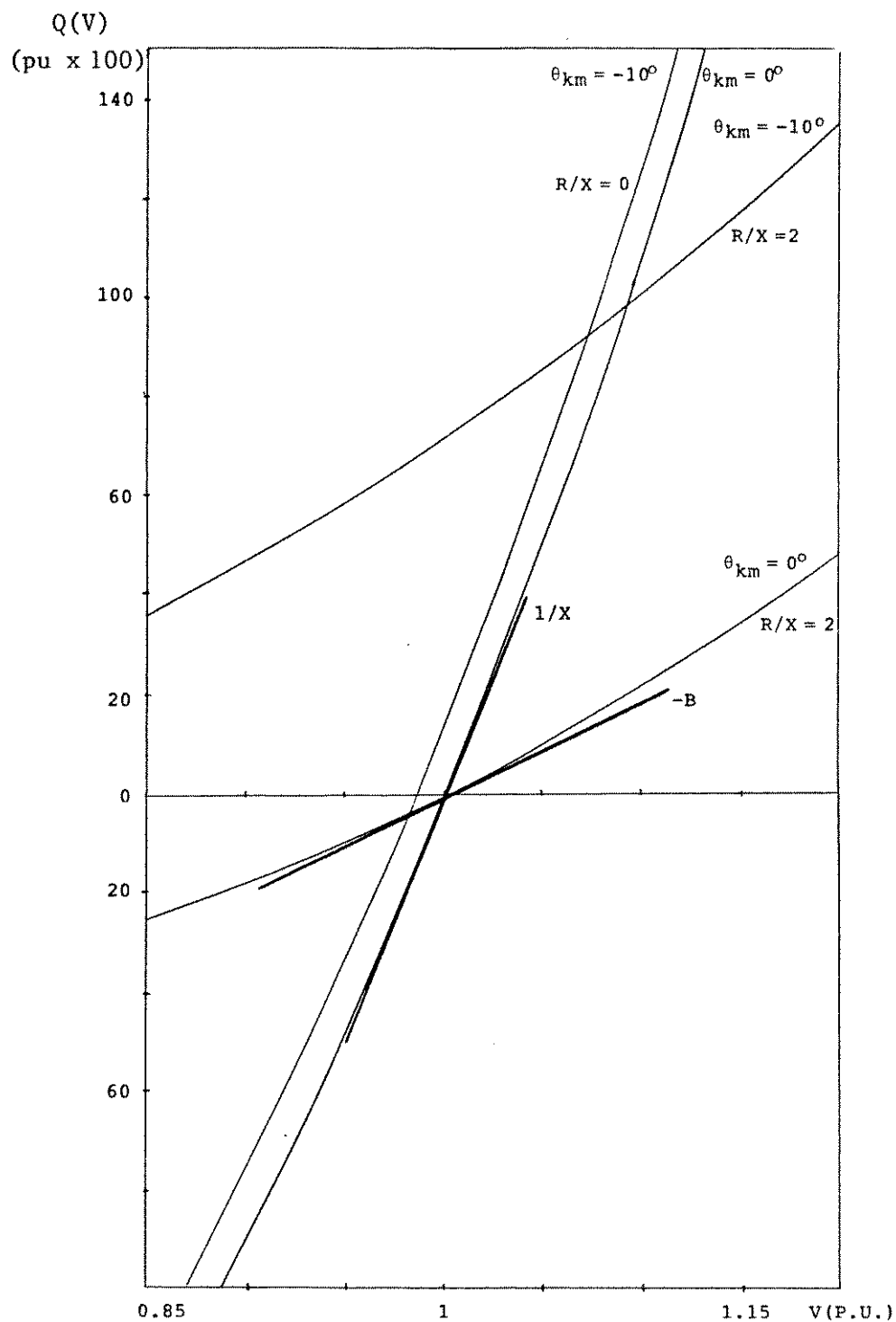


Fig. (4.12): Inclinações iniciais no sub-problema reativo, razões $R/X = 0$, $R/X = 2$; $\theta_{km} = 0^\circ$, $\theta_{km} = -10^\circ$ (Sistema de duas barras)

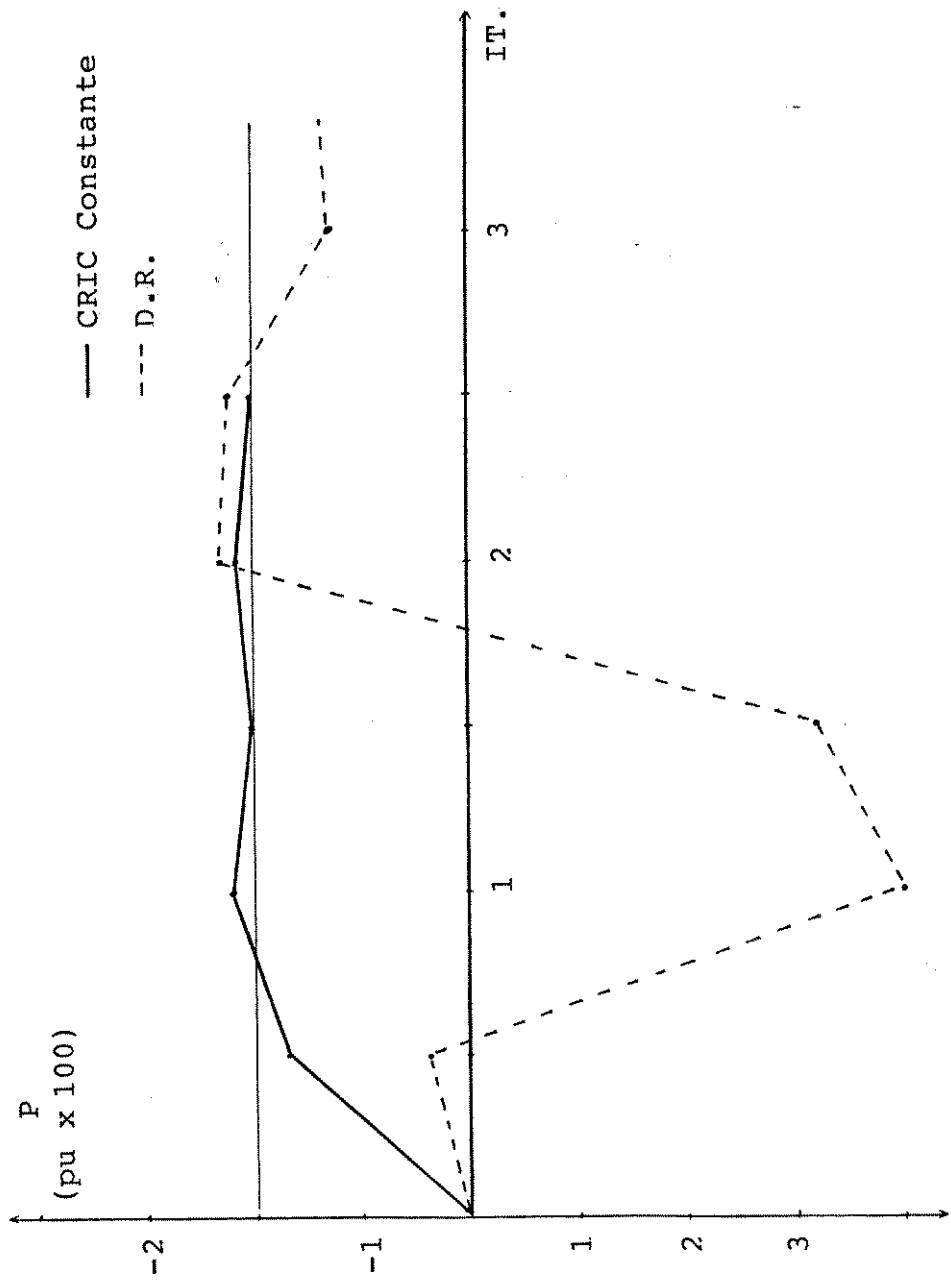


Fig. (4.13): Convergência do sub-problema ativo para o sistema de duas barras utilizando os métodos D.R. e CRIC Constante; Razão $R/X=2$, tolerância 0.001 p.u.

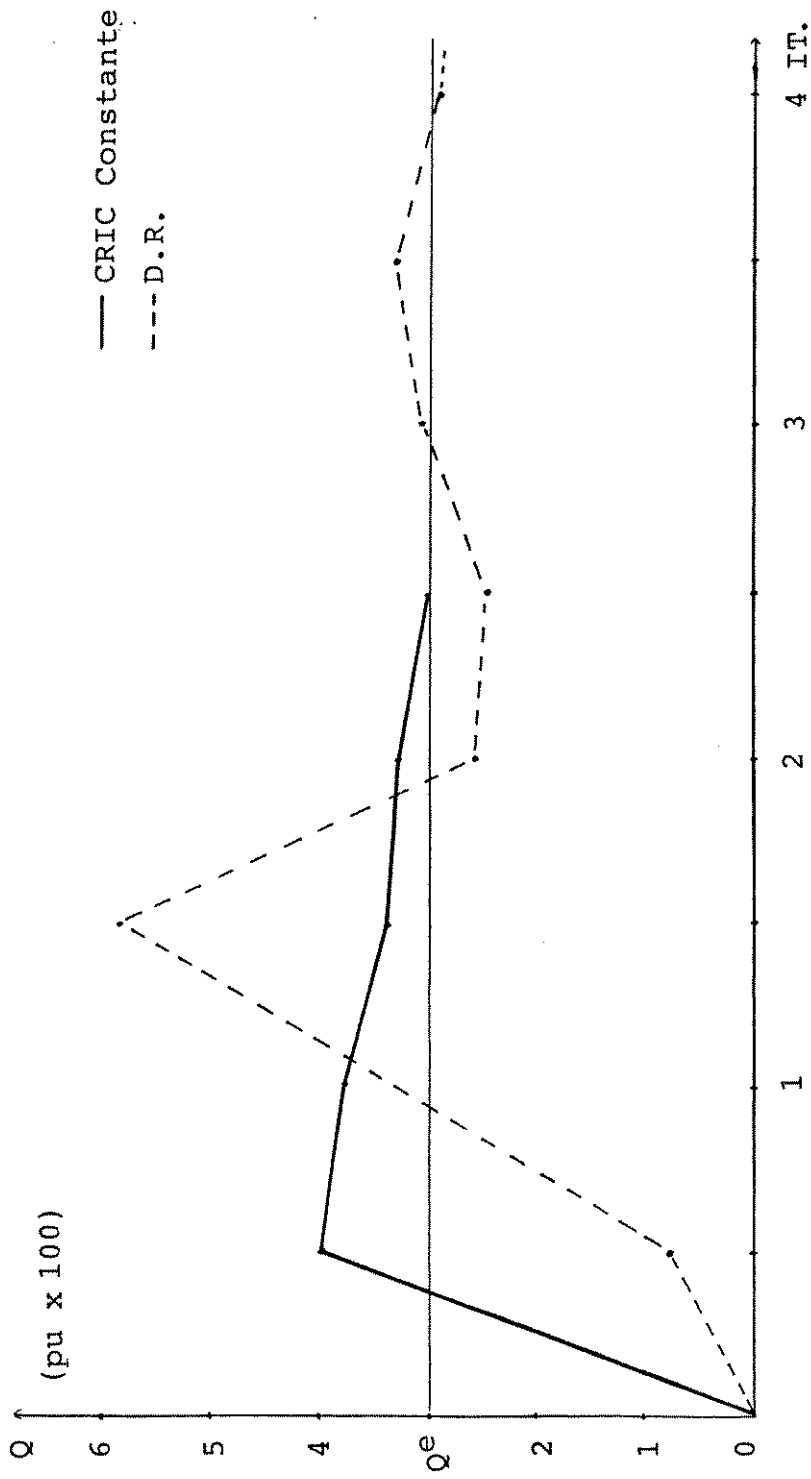


Fig. (4.14): Convergência do sub-problema reativo para o sistema de duas barras, utilizando os métodos desacoplado rápido e CRIC Constante; Razão $R/X = 2$, tolerância 0.001 p.u. (Convergência final: método D.R. 5 iterações, método CRIC Constante 2.5 iterações).

CAPÍTULO V

TESTES E RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados testes dos métodos CRIC e CRIC constante para cálculo de fluxo de carga sob diferentes condições e exigências. Comparam-se os resultados obtidos com os métodos clássicos, isto é, com os métodos N.D. e D.R.

Também se incluem considerações sobre a implementação prática dos modelos propostos/testados. Inicialmente são apresentados testes realizados em uma rede de duas barras (fig. (4.3)), que apesar de ser uma situação muito particular permite dar uma idéia da influência da razão R/X e do nível de carregamento da rede no desempenho dos métodos. Os resultados foram obtidos utilizando o computador VAX-785 do C.C.U.E.C. da UNICAMP com precisão simples, com exceção dos casos de redes de duas barras que foram obtidos usando micro-computador.

5.1 - Sistema de duas barras

Considere-se a rede de duas barras da figura (4.3), com módulo da impedância da linha igual à unidade. Fazendo variar o ângulo de perda α_{km} de -90° a $+90^\circ$ (de linha capacitiva a indutiva) gerou-se a tabela (5.1) onde se encontram incluídos os desempenhos dos métodos CRIC e CRIC constante em conjunto com os métodos tradicionais N.D. e D.R. A injeção de potên-

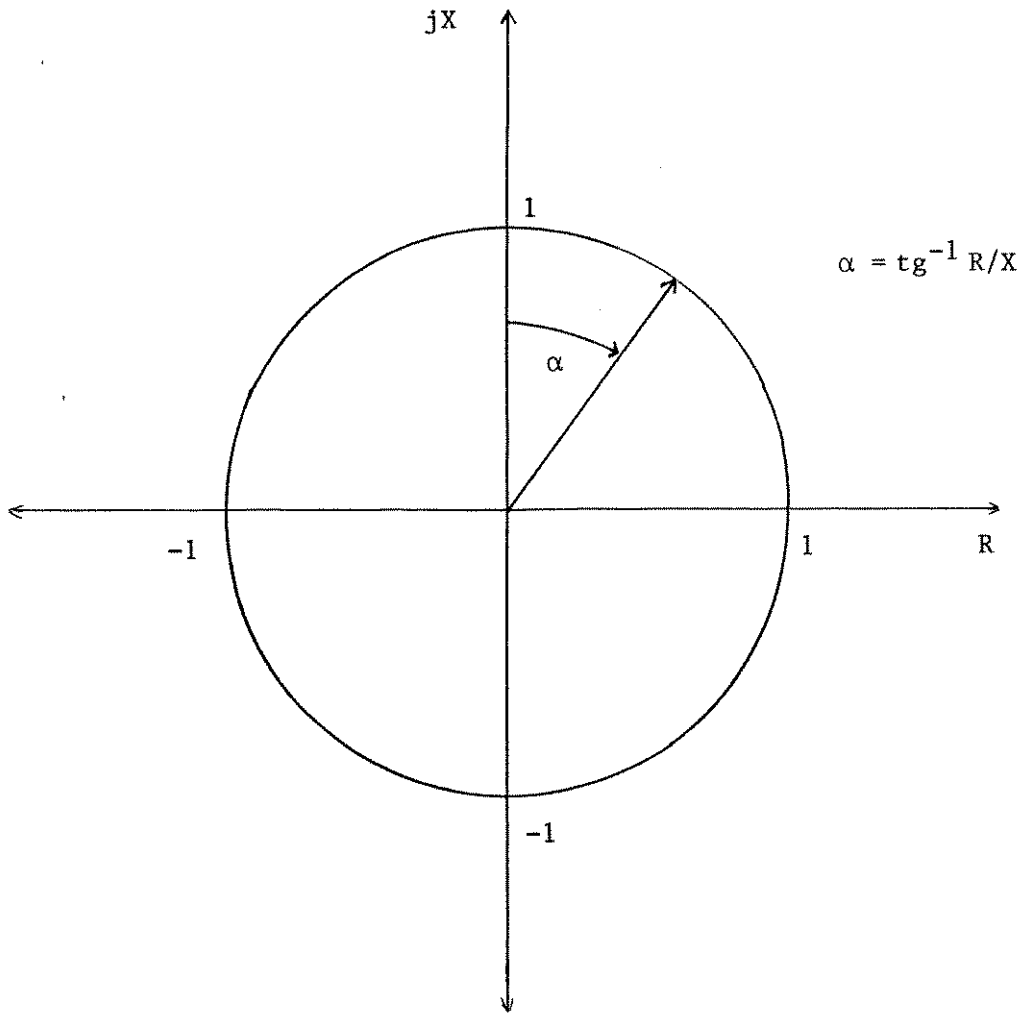


Fig. (5.1) Plano Z : Círculo de módulo de impedância unitário da linha da rede de duas barras da fig. (4.3).

cia reativa foi especificada segundo o caso de maneira que fosse obtida uma tensão numa faixa normal.

Tipicamente as redes se concentram no primeiro quadrante. Porém também são comuns casos de linhas de características capacitivas (2º quadrante) causadas por compensação série ou como resultado de uma rede equivalente. Na tabela (5.1) evidencia-se a supremacia do modelo constante do CRIC com relação ao método D.R., em especial quando as razões R/X são altas. De maneira análoga verifica-se o melhor desempenho do método CRIC com relação ao método N.D. apesar que ele também diverge na região de razões R/X muito altas. Isto está relacionado com o comentado no capítulo anterior com relação ao denominador de L_C , o qual pode-se anular quando o ângulo de perda α_{km} e a abertura angular da linha se combinam para esse fato (ver expressão (4.19)). Neste sentido é importante tornar claro que ainda que a abertura angular final do processo de convergência conjugada com α_{km} não atinjam ± 90 graus (ou simplesmente valores próximos que façam L_C muito grande), isto pode acontecer mesmo durante o processo, devido principalmente às correções angulares elevadas (comportamento "otimista" da matriz H) fornecidas pelo sub-problema ativo.

Método \ R/X	0	0.4	0.8	1	1.4	1.8	2	2.4	2.8	3
CRIC CONSTANTE	1.5	1.5	2.5	2	4.5	5.5	7.5	14	19.5	34.5
D.R.	1.5	2	4	3.5	12	21	33	DIV.	DIV.	DIV.
CRIC	1.5	2	2	2.5	5	4.5	5	DIV.	DIV.	DIV.
N.D.	1.5	2	5	N.C.	DIV.	DIV.	DIV.	DIV.	DIV.	DIV.
Q_2^e (p.u.)	-0.03	0	0.05	0.07	0.15	0.15	0.15	0.25	0.25	0.25
V_2 (p.u.)	.984	.975	.983	.983	.997	.975	.965	.966	.960	.942
θ_2 (°)	-5.83	-5.88	-7.08	-7.83	-11.34	-11.61	-11.68	-17.25	-17.4	-17.65

Tabela (5.1.a)

Método \ R/X	-0	-0.4	-0.8	-1	-1.4	-1.8	-2	-2.4	-2.8	-3
CRIC CONSTANTE	1.5	2	3	2.5	5	7	10	13	19	28
D.R.	1	2	3.5	4	5.5	19	50	DIV.	DIV.	DIV.
CRIC	1.5	2.5	3	3	3	4.5	5	DIV.	DIV.	DIV.
N.D.	1.5	2	8.5	3.6	DIV.	DIV.	DIV.	DIV.	DIV.	DIV.
Q_2^e (p.u.)	-0.03	-0.05	-0.07	-0.12	-0.2	-0.25	-0.28	-0.28	-0.28	-0.28
V_2 (p.u.)	1.005	.986	.970	.989	.980	.993	.986	.965	.948	.943
θ_2 (°)	5.7	6.04	6.52	8.23	9.68	14.56	16.29	16.88	17.22	17.29

Tabela (5.1.b)

Tabela (5.1): Número de iterações dos métodos para o sistema de duas barras com $P_2^e = -0.1$ p.u. e módulo de impedância constante:

- a) razões R/X ou ângulos de perda positivos (linhas indutivas)
- b) razões R/X ou ângulos de perda negativos (linhas capacitivas).

5.2 - Sistemas IEEE

A seguir são apresentados resultados obtidos com as redes IEEE 30 e IEEE 118, nas quais alteraram-se as resistências das linhas com a multiplicação por um fator K. A tolerância geral utilizada foi 0.001 p.u. para os "mismatches" ativos e reativos. Deve ter-se em conta que o fato de alterar a resistência implica em mudanças na razão R/X e na impedância das linhas, o que faz com que os casos apresentados aqui sejam de considerável exigência.

Na tabela (5.2) encontram-se os números de iterações requeridos pelos métodos CRIC e CRIC constante em conjunto com os métodos tradicionais. A versão proposta (CRIC constante) apresenta-se muito melhor que o método D.R. Por outro lado o método CRIC tem desempenho melhor que o método N.D. Na faixa de R/X altas ele diverge, o que era esperado pelo comentado na seção precedente. O método N.D. é muito sensível

Método \ K	0.5	1	2	3	4
CRIC CONSTANTE	2.5	3.5	3.5	4.5	27.5
D.R.	3	3	6.5	12.5	52.5
CRIC	3	3	3.5	5.5	DIV.
N.D.	3	9	NC	DIV.	DIV.
MAX[R/X]	0.553	1.107	2.214	3.321	4.428

Tabela (5.2): Sistema IEEE 30: Número de iterações da convergência, tolerância de 0.001 p.u. (K: fator pelo qual são multiplicadas todas as resistências das linhas.

NC : Não converge

DIV.: Diverge

às razões R/X altas, o que faz com que o seu desempenho já nas condições "standard" da rede ($K=1$) não seja bom.

Note-se que em geral os casos práticos com razões R/X altas não atingem a última coluna ($K=4$), logo o número de iterações requerido pelo método proposto é muito adequado.

Na Tabela (5.3) mostram-se os desempenhos dos métodos na rede IEEE de 118 barras, que apresenta uma máxima razão $R/X = 0.4735$ em condições "standard".

Método \ K	0.5	1	2	3	4	5
CRIC CONSTANTE	3	3.5	5.5	6.5	8.5	13.5
D.R.	3	3.5	6	10	14.5	29
CRIC	3.5	4.5	7.5	13	DIV.	DIV.
N.D.	3	4.5	27.5	DIV.	DIV.	DIV.
MAX[R/X]	0.2368	0.4735	0.947	1.42	1.894	2.368

Tabela (5.3): Sistema IEEE 118: Número de iterações requerido para convergência. Tolerância 0.001 p.u. (K: fator pelo qual são multiplicadas todas as resistências das linhas).

Tal como no caso da rede IEEE 30, o método CRIC constante proposto mostra maior eficiência no tratamento dos casos com razões R/X elevadas.

Se a rede está em regime de carga pesada o desempenho do método CRIC constante também é melhor. Isto pode-se observar na tabela (5.4), onde se selecionaram apenas os dois métodos mais eficientes para fins de comparação. Nesta tabela, o sistema IEEE 30 teve sua carga (potências especificadas) al

terada pela multiplicação por um fator K. Os reativos foram alterados de maneira a não obter tensões excessivamente baixas.

Método \ K	1.5	1.8	2	2.2	2.5
CRIC CONSTANTE	3.5	3.5	3.5	4	4.5
D.R.	3.5	4.5	4.5	5.5	5.5
Mínima Tensão	0.990	0.976	0.964	0.949	0.923

Tabela (5.4): Sistema IEEE 30: Número de iterações requerido para convergência (K: fator pelo qual são multiplicadas as potências ativas de carga), tolerância 0.001 p.u.

5.3 - Redes de Distribuição

Nesta seção apresentam-se os resultados dos testes realizados em redes de distribuição. A primeira consiste na rede de distribuição primária correspondente ao alimentador nº 17 da S/E Mairiporã [21]. São considerados os dois casos mencionados na referência; o primeiro, com a chave dos pontos 8 e 20 fechada (e portanto, existindo um anel) e o segundo considerando ela aberta.

O segundo sistema testado foi a rede subterrânea de distribuição secundária CAMBUCI I com 307 barras, 519 ligações, 58 transformadores, fator de potência 0.85 e tensão base trifásica de 208 V [24].

A rede da Tabela (5.5) é especialmente difícil pelo fato de ter incluídas chaves na forma de linhas de impedância muito baixa, o que faz a convergência muito dependente da pre

Caso Método	Chave Fecha- da (8-20)	Chave Aber- ta (8-20)
D.R.	55	4.5
CRIC CONSTANTE	14.5	3.5
N.D.	DIV.	DIV.
CRIC	24	3.5
TOLERÂNCIA (p.u.)	0.01	0.01

Tabela (5.5): Alimentador nº 17 S/E Mairiporã, 23 barras/
23 ligações: número de iterações

Tolerância (p.u.) Método	0.001	0.0001
D.R.	4	7.5
CRIC CONSTANTE	4	5.5
N.D.	DIV.	DIV.
CRIC	4	6

Tabela (5.6): Rede Subterrânea Cambuci-I 308 barras/
516 ligações: nº de iterações.

cisão do computador. Ainda nesta condição adversa, o método proposto se apresenta notoriamente melhor que os clássicos.

No caso da Tabela (5.6) tem-se uma rede mais uniforme. Ainda que todos os métodos apresentem número de iterações semelhantes, o CRIC e o CRIC-CONSTANTE tiveram um desempenho tal que os "mismatches" finais foram comparativamente menores.

5.4 - Redes Brasileiras

Nesta seção apresentam-se resultados de testes de fluxo de carga em redes brasileiras. Tais sistemas são considerados "difíceis", já que combinam grande variedade de situações que dificultam a convergência, como por exemplo linhas muito curtas, razões R/X elevadas, equivalentes externos com elementos shunt elevados, etc.

Na Tabela (5.7) confrontam-se os desempenhos dos métodos CRIC Constante e D.R. em quatro redes de transmissão, utilizando-se uma tolerância de 1 MW e 1 MVar com inicialização em "flat start".

Barras/li- gações	320	626	810	1138
Métodos	470	992	1340	1899
CRIC CONSTANTE	6.5	7	7	8.5
D.R.	7	13.5	7	11.5
MAX[R/X]	0.644	0.979	1.979	1.30

Tabela (5.7): Redes brasileiras: número de iterações dos métodos CRIC Constante e D.R. Tolerância de 1 MW e 1 MVar; inicialização em "flat start".

O desempenho do modelo CRIC Constante mostra-se nestes casos igual ou melhor que o método D.R., completando-se assim os testes, que partiram de um simples sistema de duas barras para redes IEEE, de distribuição e finalmente de transmissão. O método CRIC Constante mostrou-se robusto em todo esse espectro e melhor que o tradicional método D.R.

Para completar estes testes, na Tabela (5.8) encontram-se os desempenhos dos métodos CRIC e N.D. para as mesmas redes anteriores.

Barras/li- gações \ Método	320	626	810	1138
	470	992	1340	1899
CRIC	6	8.5	11	11
N.D.	6.5	N.C.	12.5	DIV.

Tabela (5.8): Redes brasileiras: número de iterações para convergência dos métodos CRIC e N.D. ; tolerância de 1 MW e 1 MVar; inicialização em "flat start".

CAPÍTULO VI

COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Em três aspectos principais pode ser dividido este trabalho:

- Primeiramente, a apresentação e discussão da metodologia de "acoplamento implícito" de J. Carpentier e como uma contribuição desta tese a proposta do método "CRIC Constante".
- Em segundo lugar, a discussão sobre a influência da linearização no problema de cálculo de fluxo de carga convencional e a individualização dos elementos que caracterizam (ou determinam) o bom desempenho dos métodos de matrizes constantes em fluxo de carga.
- Finalmente, tem-se as extensões da metodologia de "acoplamento implícito", algumas já aplicadas com sucesso, e outras propostas como futuras linhas de pesquisa. Incluem-se também aqui comentários de trabalho em andamento atualmente.

6.1 - Acoplamento Implícito: Métodos CRIC e CRIC Constante

Os métodos desacoplados baseiam-se em características inerentes das redes de energia elétrica de A.T. operando em

regime permanente, onde se verifica uma maior intensidade das sensibilidades H e L em comparação com N e M respectivamente na matriz Jacobiana do método de Newton. Estes fatos sugerem a decomposição do problema original de fluxo de carga em dois sub-problemas (sub-problema ativo e sub-problema reativo) que são resolvidos alternadamente [6].

Um modelo mais simples, rápido e robusto (método desacoplado rápido) foi proposto por Stott e Alsac [7] a partir do método Newton Desacoplado, onde se consideram aproximações derivadas de características operacionais e topológicas típicas em redes de A.T.

A eficiência dos métodos desacoplados está ligada à validade das hipóteses simplificadoras que os geraram. O método N.D. é especialmente sensível a isto, limitando a sua aplicabilidade apenas a redes bem comportadas. O método D.R., apesar da sua origem aproximada, tem a particularidade de manter bom desempenho ainda para casos de valores da razão R/X que excedam demasiado a unidade. Porém em casos de razões R/X mais elevadas, a convergência é demorada, e em alguns casos não é atingida.

A metodologia de "acoplamento implícito" formulada por J. Carpentier [18] fornece uma ferramenta matemática para tratar o problema do acoplamento, de maneira a continuar no esquema desacoplado, mas considerando-o de "forma implícita". Carpentier apresenta esta filosofia enfatizada para o problema de fluxo de carga ótimo, além de controle em tempo real. Neste trabalho tem-se analisado e discutido apenas a aplicação do método CRIC (Constrained Reactive Implicit Coupling) ao cálculo de fluxo de carga. Nesta aplicação o seu desempenho é muito superior ao método Newton Desacoplado, em especial no tratamento de razões R/X elevadas, num espectro razoável. Isto foi confirmado nos testes de redes de B.T. no capítulo anterior, onde o método CRIC converge satisfatoriamente enquanto que o método de Newton desacoplado diverge em todos esses casos.

Porém, as crescentes exigências de tempo de processa-

mento e armazenamento sobre os métodos de cálculo de fluxo de carga tem levado a procurar métodos mais simples e rápidos, especialmente do tipo matrizes constantes, como é o caso do método Desacoplado Rápido. Motivados nesta necessidade e nas dificuldades do método D.R. em aplicações de razões R/X elevadas, propôs-se nesta tese o método "CRIC Constante". A sua dedução é possível a partir de duas aproximações alternativas, as que aplicadas independentemente nas equações do método CRIC levam ao mesmo resultado, isto é, às fórmulas do método CRIC Constante. A primeira é válida em redes de B.T. e considera que as aberturas angulares são pequenas e as tensões perto de 1 p.u.. A hipótese alternativa é válida em redes de U.A.T. e E.A.T. e considera $B_{km} \gg G_{km} \text{ sen}\theta_{km}$ e que as tensões são máximas de 1 p.u..

No método proposto as aproximações utilizadas na sua dedução baseiam-se nas ordens de grandeza das variáveis e parâmetros, enquanto no método D.R., além de se introduzir similares hipóteses simplificadoras, despreza-se explicitamente a resistência na formação de B' . Esta diferença, somada à filosofia de acoplamento implícito, fornece ao método proposto uma consistência teórica maior que o método D.R., o que é confirmado pela prática: o método CRIC Constante resolve tão efetivamente como o método D.R. casos de A.T. e muito mais eficientemente os casos de B.T. e em geral, casos que apresentam acoplamento ativo-reativo não desprezível.

Muitos trabalhos têm sido publicados [14], [15], [16] e [17], como alternativas ao método D.R. ou com o fim de melhorar o seu desempenho para razões R/X altas. Porém nenhuma dessas propostas tem-se apresentado claramente vantajosas e consistentes para substituí-lo. Todos estes esforços contrastam com a simplicidade do método "CRIC Constante", obtido mediante uma dedução de inegável coerência, que é rápido, robusto, de sugestiva dualidade com relação ao método D.R. e que resolve melhor que estas situações de razões R/X elevadas.

6.2 - Linearização no Problema do Fluxo de Carga e Características dos Métodos de Matrizes Constantes

Neste trabalho tem-se questionado a importância da qualidade da linearização no cálculo de fluxo de carga pelos métodos desacoplados. A origem da discussão surge da simples observância da geração dos métodos D.R. e CRIC Constante.

No caso do método D.R. o processo de aproximações inicia-se no método de Newton; desprezando-se as matrizes N e M chega-se ao método N.D., cuja linearização na prática já é aproximada e portanto leva um erro implícito. Sobre este último modelo novas aproximações são introduzidas chegando-se ao método D.R., que diferentemente do método N.D., possui um desempenho robusto e confiável.

Quando se aplica o método CRIC ao problema de fluxo de carga, tampouco se tem evidência que garanta uma melhora na linearização. Isto porque aqui a derivada L_C é obtida de uma característica $Q(V)$ com potência ativa constante que é utilizada para resolver um sub-problema reativo com ângulo constante. Seguidamente, ao introduzir aproximações no método CRIC Constante, tem-se obtido analogamente aos métodos de Stott um modelo aproximado que é mais eficiente e robusto.

Isto mostra que a linearização nos modelos desacoplados de fluxo de carga convencional não influi na obtenção de um bom método de cálculo. Ela é em grande parte irrelevante, já que o processo ganha mais robustez à medida que as matrizes sejam mais insensíveis às mudanças de ponto de operação; o extremo desta insensibilidade é justamente o caso de matrizes constantes. Aqui é importante notar o seguinte; esta sistemática "perda de qualidade" da linearização tem sido com uma tendência que é fundamental para o bom desempenho dos métodos de matrizes constantes : deixar um sub-problema mais conservativo que o outro.

No método CRIC Constante, de forma natural e sem heurística adicional, o sub-problema reativo é deixado conservativo, o que é justificável dado que ele é mais susceptível a variações e porque a solução para a tensão está em geral

perto de 1 p.u., precisando-se de correções pequenas. Os testes realizados nesta tese mostram que esta eleição é adequada.

No método D.R. a escolha do sub-problema ativo como "conservativo" foi feita empiricamente, desprezando-se a resistência na formação da matriz B' . Isto faz com que, para razões R/X elevadas, o sub-problema reativo gere correções grandes para a tensão, afastando-se da solução para em seguida fazer a correção voltando, configurando quadros de convergência demorada e até de divergência.

As alternativas de deixar ambos os problemas conservativos (lentos) ou rápidos apresentam desvantagens. No primeiro caso o processo fica proibitivamente lento, enquanto que no segundo as correções geradas para V e θ são "otimistas", isto é, de magnitudes consideráveis que, para casos de razões R/X de valores intermediários causam divergência, não sendo então, recomendável.

6.3 - Extensões da Metodologia do "Acoplamento Implícito": Trabalhos Futuros e em Andamento.

J. Carpentier [18] enfatizou no seu trabalho a boa qualidade das sensibilidades obtidas com o método CRIC e propôs a sua aplicação no problema de fluxo de carga ótimo reativo. Esta área de aplicação se apresenta interessante e fértil, já que existe a recente experiência de outros pesquisadores que utilizaram a matriz L_C como sensibilidade no processo de otimização no planejamento de reativos com grande sucesso [23].

Outra possível aplicação do método CRIC pode ter-se no fluxo de carga ótimo utilizando o método de Newton [22] onde, no caso desacoplado, novamente surgem problemas em condições de acoplamento não desprezível.

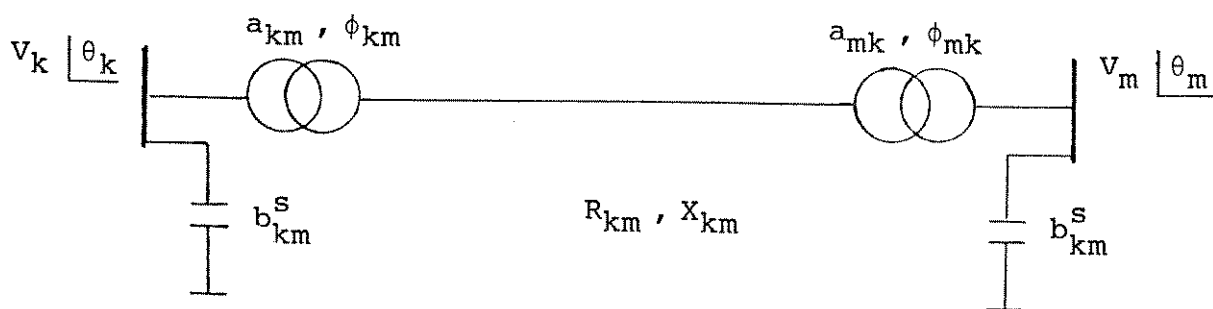
Atualmente está-se pesquisando o modelo normalizado do método CRIC, que na sua versão constante apresenta muito bom desempenho nas redes brasileiras de A.T. Esta modificação

do método CRIC e os resultados de alguns testes são incluídos no Apêndice B, com caráter de motivação e não conclusiva, já que pelo dito anteriormente, a sua pesquisa está em andamento.

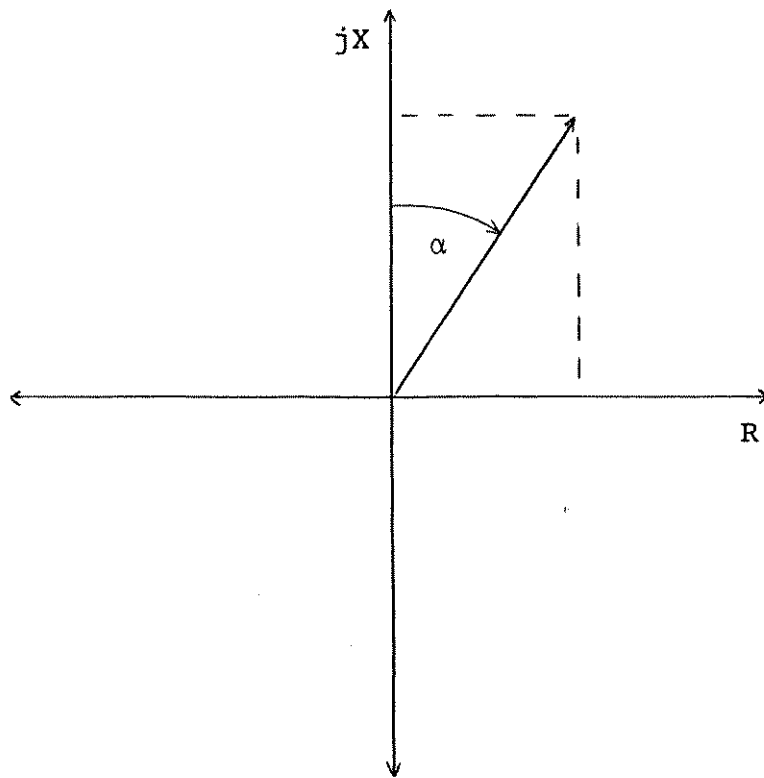
APÊNDICE A

DEDUÇÃO DAS EXPRESSÕES PARA O MÉTODO "CRIC" [18]A.1 - Definições Preliminares

Seja o bipolo generalizado da figura (A.1)



(A.1.a)



(A.1.b)

Fig.(A.1): a) Bipolo generalizado
b) Plano Z

Define-se na figura (A.1):

a_{km}, a_{mk} : Razões de transformação não-nominal dos extremos k-m e m-k dos eventuais transformadores

ϕ_{km}, ϕ_{mk} : Ângulo de defasagem não-nominal entre extremos k-m e m-k dos eventuais transformadores defasadores.

b_{km}^S : Capacitância shunt da linha k-m em modelo

$V_k \angle \theta_k$: Tensão fasorial da barra k

Define-se na figura (A.1.b):

$$\alpha_{km} = \text{tg}^{-1}(R_{km}/X_{km}); \text{ ângulo de perda da linha k-m} \quad (\text{A.1})$$

$$Y_{km} = |g_{km} + jb_{km}|; \text{ M\u00f3dulo da admit\u00e2ncia da linha k-m} \quad (\text{A.2})$$

$$b_{km} = -X_{km}/(X_{km}^2 + R_{km}^2) = -Y_{km} \cos\alpha_{km} \quad (\text{A.3})$$

$$g_{km} = R_{km}/(X_{km}^2 + R_{km}^2) = Y_{km} \text{sen}\alpha_{km} \quad (\text{A.4})$$

Fluxo de pot\u00eancia no bipolo da fig. (A.1.a):

$$P_{km} = Y_{km} a_{km} a_{mk} V_k V_m \text{sen}(\theta_{km} + \phi_{km} - \phi_{mk} - \alpha_{km}) + \dots Y_{km} a_{km}^2 V_k^2 \text{sen}\alpha_{km} \quad (\text{A.5})$$

$$Q_{km} = -Y_{km} a_{km} a_{mk} V_k V_m \cos(\theta_{km} + \phi_{km} - \phi_{mk} - \alpha_{km}) + \dots a_{km}^2 V_k^2 (Y_{km} \cos\alpha_{km} - b_{km}^S) \quad (\text{A.6})$$

Pot\u00eancias l\u00edquidas de barras:

$$P_k = \sum_{k \neq m} P_{km} \quad (\text{A.7})$$

$$Q_k = \sum_{k \neq m} Q_{km} - b_k^S V_k^2$$

Logo:

$$P_k = \sum_{k \neq m} Y_{km} a_{km} a_{mk} V_k V_m \text{sen}(\theta_{km} + \phi_{km} - \phi_{mk} - \alpha_{km}) + \dots V_k^2 \sum_{k \neq m} a_{km}^2 Y_{km} \text{sen}\alpha_{km} \quad (\text{A.8})$$

$$Q_k = - \sum_{k \neq m} Y_{km} a_{km} a_{mk} V_k V_m \cos(\theta_{km} + \phi_{km} - \phi_{mk} - \alpha_{km}) + \dots V_k^2 \left[\sum_{k \neq m} a_{km}^2 (Y_{km} \cos \alpha_{km} - b_{km}^S) - b_k^S \right] \quad (A.9)$$

Onde:

$$\theta_{km} = \theta_k - \theta_m$$

$$b_k^S = \text{Elemento shunt (externo) entre barra k e terra.}$$

A.2 - Determinação de Q(V)

Se o fluxo ativo no bipolo da figura (A.1) é constante, pode-se isolar:

$$\sin(\theta_{km} + \phi_{km} - \phi_{mk} - \alpha_{km}) = \frac{P_{km} - Y_{km} a_{km}^2 V_k^2 \sin \alpha_{km}}{Y_{km} a_{km} a_{mk} V_k V_m} \quad (A.10)$$

Para evidenciar as constantes e variáveis, define-se:

$$A_{km} = \frac{P_{km}}{Y_{km} a_{km} a_{mk}} \quad (A.11)$$

$$\beta_{km} = \frac{a_{km} \sin \alpha_{km}}{a_{mk}} \quad (A.12)$$

$$S_{km} = \sin(\theta_{km} + \phi_{km} - \phi_{mk} - \alpha_{km}) \quad (A.13)$$

Então (A.10) pode ser reescrita como:

$$S_{km} = \frac{A_{km} - \beta_{km} V_k^2}{V_k V_m} \quad (\text{A.14})$$

E, por outro lado:

$$C_{km} = \cos(\theta_{km} + \phi_{km} - \phi_{mk} - \alpha_{km}) \quad (\text{A.15})$$

$$C_{km} = \sqrt{1 - S_{km}^2} \quad (\text{A.16})$$

Onde, para soluções fisicamente estáveis o argumento de C_{km} e S_{km} deve estar entre $-\pi/2$ e $+\pi/2$.

Considere-se agora a expressão da potência reativa (A.9). Fazendo-se:

$$J_{km} = Y_{km} a_{km} a_{mk} \quad (\text{A.17})$$

$$N_k = \sum_{k \neq m} a_{km}^2 (Y_{km} \cos \alpha_{km} - b_{km}^s) - b_k^s \quad (\text{A.18})$$

e considerando (A.15), a expressão (A.9) fica:

$$Q_k = N_k V_k^2 - V_k \sum_{k \neq m} J_{km} V_m C_{km} = Q_k(V) \quad (\text{A.19})$$

Onde (A.19) é função de V na hipótese que P_{km} é constante.

A.3 - Determinação da sensibilidade L_C

Derivando parcialmente (A.19), tem-se:

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = 2 V_k N_k - \sum_{k \neq m} J_{km} V_m C_{km} - V_k \sum_{k \neq m} J_{km} V_m \frac{\partial C_{km}}{\partial V_k} \quad (\text{A.20})$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_m} = - V_k J_{km} C_{km} - V_k J_{km} V_m \frac{\partial C_{km}}{\partial V_m} \quad (\text{A.21})$$

Para determinar (A.20) e (A.21) é conveniente abordar em forma separada os cálculos de $\partial C_{km}/\partial V_k$ e $\partial C_{km}/\partial V_m$. A derivada de C_{km} para um V qualquer é:

$$\frac{\partial C_{km}}{\partial V} = - \frac{S_{km}}{\sqrt{1 - S_{km}^2}} \cdot \frac{\partial S_{km}}{\partial V} = - \frac{S_{km}}{C_{km}} \cdot \frac{\partial S_{km}}{\partial V} \quad (\text{A.22})$$

Derivando (A.14) em relação a V_k , obtêm-se:

$$\frac{\partial S_{km}}{\partial V_k} = - \frac{A_{km} + \beta_{km} V_k^2}{V_k^2 V_m} \quad (\text{A.23})$$

Analogamente para V_m obtêm-se:

$$\frac{\partial S_{km}}{\partial V_m} = - \frac{S_{km}}{V_m} \quad (\text{A.24})$$

Então, substituindo (A.23) e (A.24) em (A.22), vem:

$$\frac{\partial C_{km}}{\partial V_k} = \frac{S_{km}}{C_{km}} \cdot \frac{(A_{km} + \beta_k V_k^2)}{V_k^2 V_m} \quad (\text{A.25})$$

$$\frac{\partial C_{km}}{\partial V_m} = \frac{S_{km}^2}{C_{km}^2 V_m} \quad (\text{A.26})$$

Substituindo primeiramente (A.25) em (A.20):

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} &= 2N_k V_k - \sum_{k \neq m} J_{km} \left[C_{km} V_m + \frac{S_{km}}{C_{km}} \cdot \frac{(A_{km} + \beta_{km} V_k^2)}{V_k} \right] \\ &= 2N_k V_k - \sum_{k \neq m} J_{km} \cdot E \end{aligned} \quad (\text{A.27})$$

Onde:

$$E = C_{km} V_m + \frac{S_{km}}{C_{km}} \frac{(A_{km} + \beta_{km} V_k^2)}{V_k}$$

Reescrevendo numa forma mais adequada torna-se:

$$\begin{aligned} E &= \frac{C_{km}^2 V_k V_m + S_{km} (A_{km} + \beta_{km} V_k^2)}{C_{km} V_k} \\ &= \frac{(1 - S_{km}^2) V_k V_m + S_{km} (A_{km} + \beta_{km} V_k^2)}{C_{km} V_k} \\ &= \frac{D}{C_{km} V_k} \end{aligned} \quad (\text{A.28})$$

Onde:

$$D = (1 - S_{km}^2) V_k V_m + S_{km} (A_{km} + \beta_{km} V_k^2)$$

Manipulando algebricamente:

$$\begin{aligned} D &= V_k V_m + S_{km} (A_{km} + \beta_{km} V_k^2 - S_{km} V_k V_m) \\ &= V_k V_m + S_{km} [A_{km} + \beta_{km} V_k^2 - (A_{km} - \beta_{km} V_k^2)] \end{aligned}$$

$$= V_k V_m + 2 \beta_{km} S_{km} V_k^2 = V_k (V_m + 2 \beta_{km} S_{km} V_k)$$

Substituindo o D assim obtido em (A.28):

$$E = \frac{D}{C_{km} V_k} = \frac{V_m + 2 \beta_{km} S_{km} V_k}{C_{km}}$$

Substituindo o E obtido acima em (A.27), tem-se finalmente:

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = 2 N_k V_k - \sum_{k \neq m} J_{km} \left[\frac{V_m + 2 \beta_{km} S_{km} V_k}{C_{km}} \right] \quad (\text{A.29})$$

Para determinar a sensibilidade $\partial Q_k / \partial V_m$, substitui-se (A.26) em (A.21), obtendo-se:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} &= - J_{km} V_k \left[\frac{S_{km}^2}{C_{km}} + C_{km} \right] \\ &= - J_{km} V_k \left[\frac{S_{km}^2 + C_{km}^2}{C_{km}} \right] \end{aligned}$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_m} = - \frac{J_{km} V_k}{C_{km}} \quad (\text{A.30})$$

APÊNDICE B

MODELO NORMALIZADO

Neste apêndice apresenta-se o modelo normalizado do método CRIC, cuja versão constante tem muito bom desempenho em redes brasileiras de A.T. em especial com carga pesada. Este modelo continua sendo pesquisado atualmente, logo a sua apresentação aqui tem um caráter preliminar de motivação e não de conclusão.

B.1 - Método CRIC normalizado

Considere-se a equação do método CRIC para a meia iteração reativa:

$$\Delta Q = L_C \Delta V$$

Ela pode ser reformulada da seguinte maneira

$$\Delta Q/V = \bar{L} \Delta V \tag{B.1}$$

onde \bar{L} é a matriz de sensibilidade entre o vetor de funções $\Delta Q/V$ e a tensão, isto é:

$$\bar{L} = - \frac{\partial[\Delta Q/V]}{\partial V}$$

o que equivale a:

$$\bar{L} = - \frac{\partial[Q^e/V]}{\partial V} + \frac{\partial[Q/V]}{\partial V} \quad (\text{B.2})$$

A matriz \bar{L} é determinada considerando a hipótese do método CRIC, ou seja, que os fluxos de potência ativa não mudam durante a meia iteração reativa. Logo (B.1) é a equação do método "CRIC normalizado", cujo jacobiano reativo está definido por (B.2). A seguir realiza-se a dedução detalhada da matriz \bar{L} .

Dedução da matriz \bar{L}

Tem-se que:

$$\Delta Q_k = Q_k^e - Q_k(V, \theta) \quad (\text{B.3})$$

Normalizado por V_k :

$$\frac{\Delta Q_k}{V_k} = \frac{Q_k^e}{V_k} - \frac{Q_k(V, \theta)}{V_k} \quad (\text{B.4})$$

Derivando com relação de V_k e V_m respectivamente:

$$\frac{\partial[\Delta Q_k/V_k]}{\partial V_k} = - \frac{Q_k^e}{V_k^2} - \frac{\partial[Q_k/V_k]}{\partial V_k} \quad (\text{B.5.a})$$

$$\frac{\partial[\Delta Q_k/V_k]}{\partial V_m} = - \frac{\partial[Q_k/V_k]}{\partial V_m} \quad (\text{B.5.b})$$

Recordando que no método Newton as sensibilidades relativas às variáveis de estado tem sinal negativo [1] tem-se:

$$\bar{L}_{kk} = \frac{Q^e}{V_k^2} + \frac{\partial [Q_k/V_k]}{\partial V_k} \quad (\text{B.6.a})$$

$$\bar{L}_{km} = \frac{\partial [Q_k/V_k]}{\partial V_m} \quad (\text{B.6.b})$$

Considere-se a expressão da injeção de potência reativa (A.9). Substituindo nela a expressão (A.15) e dividindo por V_k , tem-se:

$$\begin{aligned} \frac{Q_k}{V_k} = & - \sum_{k \neq m} Y_{km} a_{km} a_{mk} V_m C_{km} + \\ & + V_k \left[\sum_{k \neq m} a_{km}^2 (Y_{km} \cos \alpha_{km} - b_{km}^S) - b_k^S \right] \end{aligned} \quad (\text{B.7})$$

Substituindo (A.17) e (A.18) na expressão (B.7), fica:

$$\boxed{\frac{Q_k}{V_k} = N_k V_k - \sum_{k \neq m} J_{km} V_m C_{km} = \bar{Q}_k(V)} \quad (\text{B.8})$$

Considerando a mesma hipótese do apêndice A, ou seja que durante as correções das tensões os fluxos ativos nos bipolos do sistema permanecem constantes, são válidas as expressões (A.10) - (A.16) e também as expressões fundamentais (A.25) e (A.26).

Derivando (B.8) parcialmente com relação a V_k e V_m respectivamente:

$$\frac{\partial [Q_k/V_k]}{\partial V_k} = N_k - \sum_{k \neq m} J_{km} V_m \frac{\partial C_{km}}{\partial V_k} \quad (\text{B.9})$$

$$\frac{\partial [Q_k/V_k]}{\partial V_m} = 0 - J_{km} C_{km} - J_{km} V_m \frac{\partial C_{km}}{\partial V_m} \quad (\text{B.10})$$

Para obter uma expressão mais detalhada de (B.9), primeiramente substitui-se (A.25) em (B.9):

$$\frac{\partial [Q_k/V_k]}{\partial V_k} = N_k - \sum_{k \neq m} \frac{J_{km} V_m S_{km}}{V_k C_{km}} \left[\frac{A_{km} + \beta_{km} V_k^2}{V_k V_m} \right] \quad (\text{B.11})$$

Porém:

$$\frac{A_{km} + \beta_{km} V_k^2}{V_k V_m} = S_{km} + \frac{2\beta_{km} V_k^2}{V_k V_m} \quad (\text{B.12})$$

Finalmente, substituindo-se (B.12) em (B.11):

$$\frac{\partial [Q_k/V_k]}{\partial V_k} = N_k - \sum_{k \neq m} \frac{J_{km} S_{km}}{C_{km}} \left[\frac{S_{km} V_m + 2\beta_{km} V_k}{V_k} \right] \quad (\text{B.13})$$

Por outro lado, para detalhar (B.10), substitui-se (A.26) em (B.10):

$$\begin{aligned} \frac{\partial [Q_k/V_k]}{\partial V_m} &= - J_{km} C_{km} - \frac{J_{km} V_m S_{km}^2}{C_{km} V_m} \\ &= - J_{km} \left[C_{km} + \frac{S_{km}^2}{C_{km}} \right] = - \frac{J_{km}}{C_{km}} \end{aligned} \quad (\text{B.14})$$

Substituindo-se (B.13) em (B.6a) e (B.14) em (B.6b), obtêm-se, finalmente, as matrizes do método CRIC normalizado:

$$\bar{L}_{kk} = \frac{Q^e}{V_k^2} + N_k - \sum_{k \neq m} \frac{J_{km} S_{km}}{C_{km}} \left[\frac{S_{km} V_m + 2\beta_{km} V_k}{V_k} \right] \quad (\text{B.15})$$

$$\bar{L}_{km} = - J_{km} / C_{km} \quad (\text{B.16})$$

Logo, a matriz \bar{L} substitui a matriz L' no esquema desacoplado do método N.D., com a diferença que aqui utiliza-se uma sensibilidade obtida a partir da função $[\partial Q/V]$, que é equivalente à componente reativa da injeção de corrente numa barra.

Testes realizados com o modelo normalizado não mostram diferença significativa de desempenho com relação ao método CRIC. Nas tabelas (B.1) e (B.2) encontram-se os números de iterações de ambos os métodos nos sistemas IEEE 30 e IEEE 118, onde as resistências têm sido multiplicadas por um fator. Os processos foram inicializados com "flat start".

MÉTODO \ K	0.5	1	2	3
CRIC NORMALIZADO	2.5	2.5	3.5	5.5
CRIC	3	3	3.5	5.5

Tabela (B.1) - Sistema IEEE 30: número de iterações para convergência utilizando tolerância de 0.001 p.u. (K: fator pelo qual todas as resistências das linhas são multiplicadas)

MÉTODO \ K	0.5	1	2	3
CRIC NORMALIZADO	3.5	4.5	7.5	13
CRIC	3.5	4.5	7.5	13

Tabela (B.2): - Sistema IEEE 118: número de iterações para convergência com tolerância de 0.001 p.u. (K: fator pelo qual são multiplicadas todas as resistências das linhas).

O modelo normalizado não desperta interesse imediato neste trabalho por não apresentar diferença com relação ao método CRIC. Além disso, em cálculo de fluxo de carga convencional interessam métodos de matrizes constantes. Logo, o desenvolvimento matemático de \bar{L} é utilizado aqui como a base analítica para a dedução da versão "normalizada constante", que é apresentada a seguir.

B.2 - CRIC Normalizado: Versão Constante.

Para maior simplicidade, considere-se o sistema sem transformadores defasadores e com os transformadores em fase modelados pelos seus equivalentes π [1]. Nestas condições as expressões de \bar{L} ficam:

$$\bar{L}_{kk} = \frac{Q_k^e}{V_k^2} - B_{kk} - \sum_{k \neq m} \frac{\text{sen}(\theta_{km} - \alpha_{km})}{\cos(\theta_{km} - \alpha_{km})} \left[\frac{2 V_k g_{km} + V_m Y_{km} \text{sen}(\theta_{km} - \alpha_{km})}{V_k} \right] \quad (\text{B.17})$$

$$\bar{L}_{km} = \frac{-Y_{km}}{\cos(\theta_{km} - \alpha_{km})} \quad (\text{B.18})$$

Utilizando as mesmas hipóteses simplificadoras do método CRIC constante (Capítulo 4), isto é $V \cong 1$ p.u. e $\theta_{km} \cong 0$, obtém-se:

$$\bar{L}_{kk} \cong Q_k^e - B_{kk} - \sum_{k \neq m} \frac{-\text{sen}\alpha_{km}}{\text{cos}\alpha_{km}} \left[2g_{km} - Y_{km} \text{sen}\alpha_{km} \right] \quad (\text{B.19})$$

$$\bar{L}_{km} \cong \frac{-Y_{km}}{\text{cos}\alpha_{km}} \quad (\text{B.20})$$

mas, do apêndice (A) tem-se que:

$$Y_{km} \text{sen}\alpha_{km} = g_{km} \quad (\text{B.21})$$

e

$$\frac{\text{sen}\alpha_{km}}{\text{cos}\alpha_{km}} = \text{tg}\alpha_{km} = \frac{-g_{km}}{b_{km}} \quad (\text{B.22})$$

$$\text{cos}\alpha_{km} = -\frac{b_{km}}{Y_{km}} \quad (\text{B.23})$$

Substituindo inicialmente em (B.19) fica:

$$\begin{aligned} \bar{L}_{kk} &\cong Q_k^e - B_{kk} - \sum_{k \neq m} \frac{g_{km}}{b_{km}} [2g_{km} - g_{km}] \\ &\cong Q_k^e - B_{kk} - \sum_{k \neq m} \frac{g_{km}^2}{b_{km}} \end{aligned} \quad (\text{B.24})$$

Lembrando que:

$$B_{kk} = \sum_{k \neq m} (b_{km} + b_{km}^S) + b_k^S$$

substituindo em (B.24)

$$\bar{L}_{kk} \cong Q_k^e - \sum_{k \neq m} b_{km}^S - b_k^S - \sum_{k \neq m} [b_{km} + \frac{g_{km}^2}{b_{km}}]$$

onde:

$$BSH_k = \sum_{k \neq m} b_{km}^S - b_k^S : \text{soma de todos os elementos shunt ligados à barra K.}$$

e

$$\frac{b_{km}^2 + g_{km}^2}{b_{km}} = - 1/X_{km}$$

finalmente:

$$\bar{L}_{kk} \cong Q_k^e - BSH_k + \sum_{k \neq m} 1/X_{km} \quad (B.25)$$

e substituindo (B.23) em (B.20) obtém-se de maneira similar:

$$\bar{L}_{km} = - 1/X_{km} \quad (B.26)$$

Redefinindo \bar{L}_{kk} e \bar{L}_{km} :

$\bar{B}_{k-k} = Q_k^e - BSH_k + \sum_{k \neq m} 1/X_{km}$	(B.27)
$\bar{B}_{k-m} = - 1/X_{km}$	

O método CRIC normalizado constante (C.N.C.) diferencia-se do método CRIC constante apenas na diagonal. Em (B.27) aparece o valor de injeção de potência reativa especificada na barra K (que é uma informação sobre a condição de operação do sistema) no lugar de BSh_K .

De maneira análoga ao caso do modelo normalizado da seção anterior, o método C.N.C. tem desempenho idêntico ao método CRIC constante em redes pequenas e de médio porte. Isto se verifica claramente nas tabelas (B.3) e (B.4), onde se resume o seu desempenho nos sistemas IEEE 30 e IEEE 118, com inicialização em "flat start".

MÉTODO \ K	0.5	1	2	3	4
C.N.C.	2.5	3.5	3.5	4.5	27.5
CRIC CONSTANTE	2.5	3.5	3.5	4.5	27.5

Tabela (B.3) - Sistema IEEE 30: número de iterações para convergência considerando tolerância de 0.001 p.u. (K: fator pelo qual são multiplicadas todas as resistências das linhas).

MÉTODO \ K	0.5	1	2	3	4	5
C.N.C.	3	3.5	5.5	6.5	8.5	13.5
CRIC CONSTANTE	3	3.5	5.5	6.5	8.5	13.5

Tabela (B.4) - Sistema IEEE 118: número de iterações para convergência considerando tolerância de 0.001 p.u. (K: fator pelo qual são multiplicadas todas as resistências das linhas).

O método C.N.C. tem melhor desempenho que o método CRIC-constante em redes brasileiras de A.T. operando com carga pesada. Isto pode ser verificado na tabela (B.5) onde se encontram o número de iterações requeridas para convergir em quatro redes (320, 626, 810, 1130 barras respectivamente). A tolerância utilizada foi de 1 MW e 1 MVAR com inicialização em "flat start".

MÉTODO \ SIST. (*)	320	626	810	1130
C.N.C	6	7	5	7
CRIC CONSTANTE	6.5	7	7	8.5

Tabela (B.5) - Sistemas de transmissão brasileiros: número de iterações para convergência com tolerância de 0.01 p.u. (* : indica o número de barras do sistema)

Já que o método CRIC constante tem melhor desempenho que o método D.R., a modificação (método C.N.C.) constitui uma melhora aos resultados obtidos. Isto é especialmente interessante porque essa melhora é justamente em redes brasileiras. Devido a este fato o modelo está atualmente sendo pesquisado mais profundamente esperando-se resultados a curto prazo a serem publicados oportunamente.

REFERÊNCIAS

- [1] Monticelli, A., "Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica", Ed. E. Blücher Ltda., S.P., 1983.
- [2] Stott, B., "Review of Load Flow Calculation Methods", Proceeding of IEEE 62, 916-929, N.Y., 1974.
- [3] Ward, J. and Hale, W., "Digital Computer Solution of Power Flow Problems", AIEE Trans. (P.A.S.), vol. 75, 398-404, June 1956.
- [4] Tinney, W. and Walker, J., "Direct Solution of Sparse Network Equations by Optimally ordered Triangular Factorization", Proc. IEEE, vol. 55, 1801-1809, Nov. 1967.
- [5] Tinney, W. and Hart, C., "Power Flow Solution by Newton's Method", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-86, 1449-1456, Nov. 1967.
- [6] Stott, B., "Decoupled Newton Load Flow", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-91, 1955-1959, Sept/Oct 1972
- [7] Stott, B. and O. Alsac, "Fast Decoupled Load Flow", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-93, 859-869, May June 1974.
- [8] Stagg, G. and El-Abiad, A., "Computação Aplicada a Sistemas de Geração e Transmissão de Potência", Ed. Guanabara Dois, R.J. 1968.
- [9] Laithwaite, E. and Freris, L., "Electric Energy: Its Generation, Transmission and Use", Ed. McGraw-Hill, (Inglaterra), 1980.

- [10] Zollenkopf, K., "Bi-factorisation Basic Computational Algorithm and Programming Techniques", In: Reid, J.K. Ed. Large Sparse Sets of Linear Equations; Academic Press, 75-96, 1971 (Conference of Institute of Mathematics and Its Applications, Oxford, 5-8, April 1970).
- [11] Stott, B., "Effective Starting Process for Newton-Raphson Load Flow", Proc. Inst. Elec. Eng., Vol. 118, 983-987, Aug. 1971.
- [12] Carpentier, J., "Application of Newton's Method to the Load Flow Problem", Proc. PSCC, Queen Mary College, septembro 1963.
- [13] Deckmann, S., Pizzolante, A., Monticelli, A., Stott, B., and Alsaç, O., "Numerical Testing of Power System Load Flow Equivalents", IEEE Trans. Power Appl. Syst., vol. PAS-99, 2292-1300, N.Y., 1980.
- [14] Nagendra, P., Prakasa, K. and Nanda, J., "A Novel Hibrid Load Flow Method", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-100, 303-308, Jan 1981.
- [15] Haley, P. and Ayres, M., "Super Decoupled Load Flow with Distributed Slack Bus", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-104, 104-113, Jan 1985.
- [16] Rajičić, D. and Bose, A., "A Modification to the Fast Decoupled Power Flow for Networks with High R/X ratios", PICA, Montreal, May 1987.
- [17] Behnam-Guilani, K., "Fast Decoupled Load Flow: The Hybrid Model", PICA, Montreal, May 1987.
- [18] Carpentier, J.L., "CRIC, A New Active Reactive Coupling Process in Load Flows, Optimal Power Flows and System Control", Proc. IFAC Symposium on Power Systems

and Power Plant Control, 65-70, Beijing, Aug. 1986.

- [19] Stott, B., Alsaç, O. and Monticelli, A., "Security Analysis and Optimization", invited paper, Proceedings of the IEEE, vol. 75, nº 12, Dec. 1987.
- [20] Kirachen, D. and Van Meeteren, P., "MW/Voltage Control in Linear Programming Based Optimal Power Flow", trabalho submetido ao IEEE-PES Winter Meeting, N.Orleans, Feb, 1987.
- [21] Garcia, A., Monticelli, A., França, A., Tanaka, M., Murari, C., "Fluxo de Carga Desacoplado Rápido para Distribuição de Energia Elétrica", Relatório nº 1, contrato CESP/UNICAMP, Campinas, Agosto 1983.
- [22] Sun, D., Ashley, B., Brewer, B., Hughes, A. and Tinney W., "Optimal Power Flow by Newton Approach", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-103, 2864-2880, Oct. 1984.
- [23] Mantovani, J.R., "Planejamento de Reativos em Sistema de Energia Elétrica utilizando um Modelo Implicitamente Acoplado", Tese de Mestrado, FEE/UNICAMP, Dez 1987.
- [24] Deckmann, S., "Modelo Desacoplado para Calcular a Queda da Tensão e Fluxo de Corrente em Redes Reticuladas de Baixa Tensão", Tese de Mestrado, DEE/FEC/UNICAMP, Junho 1976.