

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

MINIMIZAÇÃO DE PERDAS EM
SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

CARLOS ALBERTO FAVARIN MURARI

01/80

Orientador: ALCIR JOSÉ MONTICELLI

Tese de Mestrado apresentada à
Faculdade de Engenharia da Uni
versidade Estadual de Campinas

JANEIRO DE 1980

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

Aos meus pais,
esposa e filho.

AGRADECIMENTOS

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho e em especial

a Alcir José Monticelli pela orientação,
a Ariovaldo Verandio Garcia pelas discussões e sugestões,
a Antonio Chaves Pizzolante e Sigmar Maurer Deckmann pela ajuda prestada,
a Elza Aoki pelo trabalho datilográfico e
a Idani T.C. Murari pelo incentivo e compreensão.

Este trabalho é uma extensão de um Projeto sobre Otimização Estática, que contou com o apoio técnico e financeiro do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL (Grupo ELETROBRÁS).

RESUMO

Neste trabalho é apresentada uma visão crítica do método Dommel-Tinney aplicado ao problema do controle reativo/tensão (minimização de perdas). Adota-se uma versão do método da matriz Hessiana e compara-se o seu bom desempenho em relação a outros métodos de cálculo de fluxo de carga ótimo. São apresentados resultados obtidos com o Sistema Interligado da Região Sudeste do Brasil (645 barras, 1019 linhas e 81 variáveis de controle).

ÍNDICE

<u>CAPÍTULO I</u>	1
INTRODUÇÃO	
 <u>CAPÍTULO II</u>	 2
APLICAÇÕES DO FLUXO DE CARGA ÓTIMO	
2.1. Introdução	2
2.2. Planejamento de Reativos: Controle Reativo/Tensão, Alocação de Capacitores e/ou Reatores, Minimização de Perdas	2
2.2.1. Formulação-1	4
2.2.2. Formulação-2	5
2.2.3. Formulação-3	7
2.3. Despacho de Carga Econômico	8
2.3.1. Formulação	9
2.3.2. Aspectos gerais	10
2.4. Análise da Segurança	10
2.4.1. Critérios operacionais	10
2.4.2. Estados do sistema	11
2.4.3. Mudanças de estado	13
2.4.4. Interface entre otimização e segurança	14
 <u>CAPÍTULO III</u>	 17
MÉTODO DOMMEL-TINNEY	
3.1. Introdução	17
3.2. Convenções	18
3.3. Fluxo de Carga Newton-Raphson	21
3.4. Fluxo de Carga Ótimo	25
3.4.1. Definição das variáveis	25
3.4.2. Conjunto das restrições	28

3.4.3. Função objetivo	30
3.4.4. Formulação do problema sem restrições de de sigualdade	30
3.4.5. Inclusão das restrições nas variáveis de controle	34
3.4.6. Inclusão das restrições funcionais	37
3.5. Gradiente Reduzido	40
3.6. Gradiente Ótimo	43
3.7. Interpolação Cúbica	49
3.8. Hessiano Aproximado	52
3.9. Método Misto	53
 <u>CAPÍTULO IV</u>	 54
TESTES E RESULTADOS	
 <u>CAPÍTULO V</u>	 77
COMENTÁRIOS	
 <u>APÊNDICE I</u>	 79
DETALHES DE CÁLCULO - MÉTODO DOMMEL-TINNEY	
I.1. Fluxo de Carga	79
I.2. Representação de Transformador	84
I.3. Multiplicadores de Lagrange	87
I.4. Gradiente Reduzido	88
I.4.1. Tensão controlada	89
I.4.2. Potência ativa gerada	91
I.4.3. Tap de transformador	92
 <u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	 98

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Neste trabalho, métodos de otimização estática aplicáveis ao problema do fluxo de carga ótimo são estudados com o objetivo de solucionar um caso específico: minimização das perdas de transmissão (controle ótimo de reativos). O problema do fluxo de carga ótimo tem recebido grande atenção nos últimos anos tanto no exterior como no Brasil onde, entretanto, os estudos têm se limitado a sistemas de pequenas dimensões. Ao contrário, este trabalho apresenta resultados obtidos com um sistema de grande porte formado pela rede Sudeste do Brasil (645 barras, 1019 linhas e 81 variáveis de controle). O Capítulo II se restringe a uma apresentação de algumas das muitas aplicações do fluxo de carga ótimo, tanto "off-line" como "on-line". No Capítulo III o método Dommel-Tinney, que foi o escolhido para a fase inicial dos estudos nesta área em virtude de receber maior atenção tanto na literatura como nas empresas e por solucionar sistemas de grande dimensão, é apresentado em detalhes. Este método servirá de base para comparações no desenvolvimento e estudo de outros métodos, na tentativa de se melhorar a eficiência bem como encontrar soluções que tirem proveito das particularidades dos sistemas existentes no país. O Capítulo IV contém os resultados obtidos com o Sistema Sudeste.

CAPÍTULO II

APLICAÇÕES DO FLUXO DE CARGA ÓTIMO

2.1. Introdução

Muitos métodos de otimização estática foram desenvolvidos e testados a fim de se resolver o problema do fluxo de carga ótimo. Entretanto, a utilização desses procedimentos pelos centros de controle dos sistemas elétricos de potência, e até mesmo em estudos de planejamento, tem sido muito restrita, em parte pelo fato do método clássico de despacho econômico [8] ter seu desempenho melhorado por meio de reformulações do cálculo das perdas incrementais e pela inclusão das restrições de segurança. Por outro lado, convém salientar que as técnicas conhecidas para o cálculo de fluxo de carga ótimo, no estágio atual, exigem um grande esforço computacional tanto em memória como em tempo de computação, além de apresentarem outros problemas como, por exemplo, a confiabilidade da convergência de muitas dessas técnicas.

Uma vez que o despacho econômico clássico se limita às potências ativas e é orientado basicamente para sistemas térmicos, torna-se importante continuar o estudo do problema do fluxo de carga ótimo, buscando procedimentos que não somente sejam suficientes mas que também incluam a parte reativa do problema.

Neste capítulo, são apresentadas algumas das muitas aplicações do fluxo de carga ótimo, que constituem mais uma motivação para o que está descrito nos parágrafos anteriores.

2.2. Planejamento de Reativos: Controle Reativo/Tensão, Alocação de Capacitores e/ou Reatores, Minimização de Perdas

A instalação de capacitores e/ou reatores em pontos estratégicos de um sistema elétrico de potência, tem a finalidade

de de assegurar um nível de tensão satisfatório, ou seja, evitar quedas ou elevações de tensão excessivas, causadas por alterações da carga, da geração, da configuração da rede durante contingências ou períodos de manutenção, etc... O tipo de instalação de potência reativa mais adequado, é uma decisão que cabe ao departamento de planejamento que considerará os vários aspectos operacionais e econômicos associados a este tipo de problema. A quantidade e a localização são também por ele determinadas e com o objetivo particular de que o total de potência reativa instalada seja mínimo.

É no planejamento da transmissão que as diversas possibilidades de configuração da rede para uma dada condição de carga e geração, tanto em regime permanente como em períodos de contingências, são analisadas e com possibilidade de se obter uma topologia final da rede, onde as tensões em algumas barras do sistema não se enquadram no perfil desejado. Daí ser necessário determinar a quantidade e o ponto de injeção dos reativos para solucionar tal problema.

Uma vez que o fornecimento de energia elétrica deve ocorrer sob tensão nominal e para isto, as condições de operação do sistema podem requerer o controle do fluxo de potência reativa em algumas linhas, é imprescindível a atuação dos dispositivos de controle reativo/tensão, proporcionando aos consumidores um serviço de boa qualidade e possibilitando uma adequada circulação de reativos entre ou dentro dos sistemas de energia elétrica, reduzindo as perdas na transmissão e procurando manter as tensões nos seus valores nominais, o que contribui para a durabilidade dos componentes dos sistemas (linhas, transformadores, equipamentos de proteção, etc.).

Recentemente [2], sentiu-se a necessidade de se obter não somente a solução para o problema do controle da tensão mas também um esquema racional de operação que minimize as perdas da transmissão. Sabe-se que é difícil estabelecer um controle integrado da potência reativa e da tensão, devido à variedade de dispositivos para tais fins (reguladores de tensão automáticos, condensadores síncronos, bancos shunt de capacitores e rea-

tores, etc.), situados em diversos pontos de um sistema, sendo que também por causa dessa variedade de dispositivos controladores, o controle individual das tensões nas barras de um sistema, frequentemente falha ou nem é apropriado, pois a operação de um deles sempre influencia, em maior ou menor grau, as tensões das barras adjacentes à sua barra de atuação. Por isso, a melhor alternativa é realizar o controle integrado.

Uma abordagem mais ampla, com discussão de métodos que podem ser utilizados para resolver os problemas citados neste item e, de métodos desenvolvidos especificamente para tais fins, é apresentada no capítulo II da ref. [4].

2.2.1. Formulação-1

Na ref. [3], a determinação do total de potência reativa instalada, o mínimo necessário, é formulada como um problema de programação não-linear podendo ser resolvido por uma simples técnica iterativa de gradiente modificado, graças a certas particularidades a ele atribuídas.

Como apresentado em [3], o referido problema pode ser proposto da seguinte forma:

Minimizar

$$F = \sum_1^C Q_1(\delta, V) \quad (\text{função objetivo}) \quad (2.1)$$

sujeita a

$$\begin{aligned} P_{\min} &\leq P(\delta, V) \leq P_{\max} \\ Q_{\min} &\leq Q(\delta, V) \leq Q_{\max} \\ V_{\min} &\leq V \leq V_{\max} \end{aligned} \quad (2.2)$$

sendo

Q_i - a quantidade de reativos na barra $i \in C$

C - conjunto das barras consideradas para a instalação

V, δ - magnitude e ângulo das tensões das barras

P - potência ativa líquida

Q - potência reativa líquida

Desde que a função objetivo F sofre influência predominante da magnitude da tensão (V) e se relaciona fracamente com o ângulo (δ), o problema pode ser reduzido a:

Minimizar

$$F = \sum_i^C Q_i(V) \quad (2.3)$$

sujeita a

$$\begin{aligned} Q_{\min} &\leq Q(V) \leq Q_{\max} \\ V_{\min} &\leq V \leq V_{\max} \end{aligned} \quad (2.4)$$

2.2.2. Formulação-2

Em se tratando do problema de controle reativo/tensão, em geral [2, 5] este apresenta duas funções objetivos:

a) Minimizar

$$F_1 = \sum_{i=1}^I (\Delta V_i)^2 \quad (2.5)$$

sendo

ΔV_i - desvio da tensão da barra i pertencente a

I - conjunto das barras observadas e controladas.

b) Minimizar

$$F_2 = \sum_{k=1}^K R_k \cdot Q_{L_k}^2 \quad (2.6)$$

sendo

Q_{L_k} - fluxo de potência reativa

R_k - resistência, referente à linha $k \in K$

K - conjunto das linhas mais importantes

Obs.: Por linhas mais importantes, se entende como sendo aquelas de maior comprimento e que portanto, na prática, são responsáveis por quase todas as perdas na transmissão.

A função objetivo F_2 só será atendida após o controle de tensão, ou seja, quando F_1 estiver minimizada, uma vez que é mais importante manter as

tensões das barras (em especial as das barras de carga) dentro de uma certa tolerância, do que se preocupar em primeiro plano, com as perdas do sistema.

Quanto às restrições, estas correspondem às limitações inerentes a todos os dispositivos controladores: transformadores com tap variável, capacitores e reatores shunt, geradores cujas tensões terminais são reguladas, etc...

2.2.3. Formulação-3

Dommel-Tinney [1] apresentam a seguinte função objetivo:

Minimizar

$$F = P_f(V, \theta) \quad (2.7)$$

sendo

P_f - potência ativa da barra de folga (slack)

V, θ - magnitude e ângulo da tensão de uma barra

Tal função se refere ao problema de fluxo ótimo de potência reativa mas, desde que as potências ativas de todas as barras (exceto a da slack) sejam constantes, minimizar P_f é estar minimizando as perdas totais do sistema.

2.3. Despacho de Carga Econômico

Um programa que minimiza os custos operacionais instantâneos de um sistema de geração, observando as restrições da transmissão, resume o que vem a ser o problema do despacho de carga econômico [6]. Por outro lado, pode-se dizer que a generalização do despacho econômico clássico [7], resultou no problema do fluxo de carga ótimo, englobando os objetivos básicos:

- a) Minimizar o custo de geração, considerando como:
 - restrição de igualdade, o atendimento da demanda e
 - restrição de desigualdade, a geração (máxima e mínima) de cada unidade.
- b) reduzir o custo da transmissão.

O comportamento do sistema de transmissão, em regime permanente, é descrito pelas equações que relacionam tensões e correntes nodais:

$$\bar{I} = Y \cdot \bar{E} \quad (2.8)$$

Por sua vez, as injeções de potências (ativa e reativa) nodais apresentam o seguinte relacionamento:

$$\bar{S} = \bar{P} + j \bar{Q} = \bar{E} \cdot \bar{I}^* = \bar{E} \cdot (Y \cdot \bar{E})^* \quad (2.9)$$

E da mesma forma que as injeções de potências, também os fluxos nas linhas e as perdas na transmissão se relacionam com as tensões nodais ($\bar{E}$).

Assim sendo, o problema do despacho de carga econômico pode ser formulado como segue.

2.3.1. Formulação

Minimizar:

$$F = \sum_{n=1}^N C_n(P_{G_n}) \quad (\text{função objetivo}) \quad (2.10)$$

Condicionada às equações de circuito e às desigualdades:

$$\begin{aligned} P_{\min} &\leq P \leq P_{\max} \\ Q_{\min} &\leq Q \leq Q_{\max} \\ V_{\min} &\leq V \leq V_{\max} \\ T_{\min} &\leq T \leq T_{\max} \end{aligned} \quad (2.11)$$

sendo:

C_n → custo da produção de P_{G_n} , incluindo $P_{G_{\text{folga}}}$.

P_{G_n} → potência ativa gerada na barra n.

Q → potência reativa líquida.

V → magnitude da tensão (E) nodal.

T → fluxos nas linhas.

Obs.: A barra de folga deve ser inserida em F pois, em caso contrário, o processo de minimização fará esta barra gerar toda a potência do sistema.

2.3.2. Aspectos gerais

Quando o sistema está operando em regime permanente, é razoável que o operador de um C.O.S. (Centro de Operação do Sistema) de uma concessionária de energia elétrica, tenha em mente duas questões:

- a) Será que o sistema no estado atual tem condições de superar eventuais perturbações sem prejuízo no fornecimento?
- b) Este mesmo estado corresponde ao ponto de operação mais econômico?

Estas questões evidenciam uma preocupação tanto com a segurança como com a economia, sendo que em algumas situações, prefere-se sacrificar a segunda em benefício da primeira.

2.4. Análise da Segurança

2.4.1. Critérios operacionais

Em regime permanente, um sistema elétrico de potência é operado para atender a demanda, satisfazendo simultaneamente, certos limites operacionais atribuídos às variáveis associadas aos diversos componentes do sistema (por exemplo: capacidade máxima de geração, limites de tensão, corrente, etc.).

Como descrito em [9], pode-se dizer que a operação de um sistema de potência está condicionada a dois conjuntos de restrições:

$g(\underline{x}, \underline{y}) = \underline{0} \rightarrow$ restrições de carga

$h(\underline{x}, \underline{y}) \geq \underline{0} \rightarrow$ restrições de operação

As restrições de carga representam as injeções de potência ativa e reativa especificadas nas barras de carga, bem como as injeções de potência ativa nas barras de geração. Entre as restrições de operação estão os limites impostos às magnitudes das tensões nodais, aos fluxos de potência aparente nas linhas de transmissão e transformadores, e às injeções de potência reativa nos nós de geração.

Um terceiro conjunto de restrições ($s(\underline{x}, \underline{y}) \geq \underline{0}$), denominados restrições de segurança, pode ser adicionado aos outros dois com o intuito de garantir um certo nível de segurança da operação do sistema. A definição deste conjunto está associada a um conjunto pré-estabelecido de contingências possíveis de ocorrer no futuro, tais como perdas de linhas ou geradores.

Desta forma, é desejável que os três conjuntos de restrições sejam respeitados sob quaisquer condições operativas, satisfazendo a função principal do sistema, qual seja, atender a demanda dentro de padrões de qualidade satisfatórios.

2.4.2. Estados do sistema

As condições de operação de um sistema de potência são caracterizadas em termos de três modos ou estados de operação [10, 12]:

- Normal
- Emergência
- Restaurador

Com base nos critérios de operação pré-estabelecidos, pode-se definir estes três estados operativos, ou seja, diz-se que um sistema de potência está operando no estado:

- Normal, quando as restrições de carga e de operação são satisfeitas.
- Emergência, quando somente as restrições de carga são respeitadas.
- Restaurador, quando somente as restrições de operação são atendidas.

É possível ainda, subdividir o Estado Normal em:

- Normal Seguro e
- Normal Inseguro ou Estado de Alerta.

No Normal Seguro todos os três critérios são atendidos e no Estado de Alerta somente as restrições de segurança estão violadas.

A tabela 2.1 resume estas definições, indicando para cada estado quais as restrições que são ou não atendidas.

ESTADO RESTRIÇÃO	NORMAL SEGURO	ALERTA	EMERGÊNCIA	RESTAURADOR
DE CARGA	SIM	SIM	SIM	NÃO
DE OPERAÇÃO	SIM	SIM	NÃO	SIM
DE SEGURANÇA	SIM	NÃO	NÃO	NÃO

Tabela 2.1

2.4.3. Mudanças de estado

Na Fig. 2.1 podem ser visualizadas as possíveis transições entre os estados definidos no item 2.

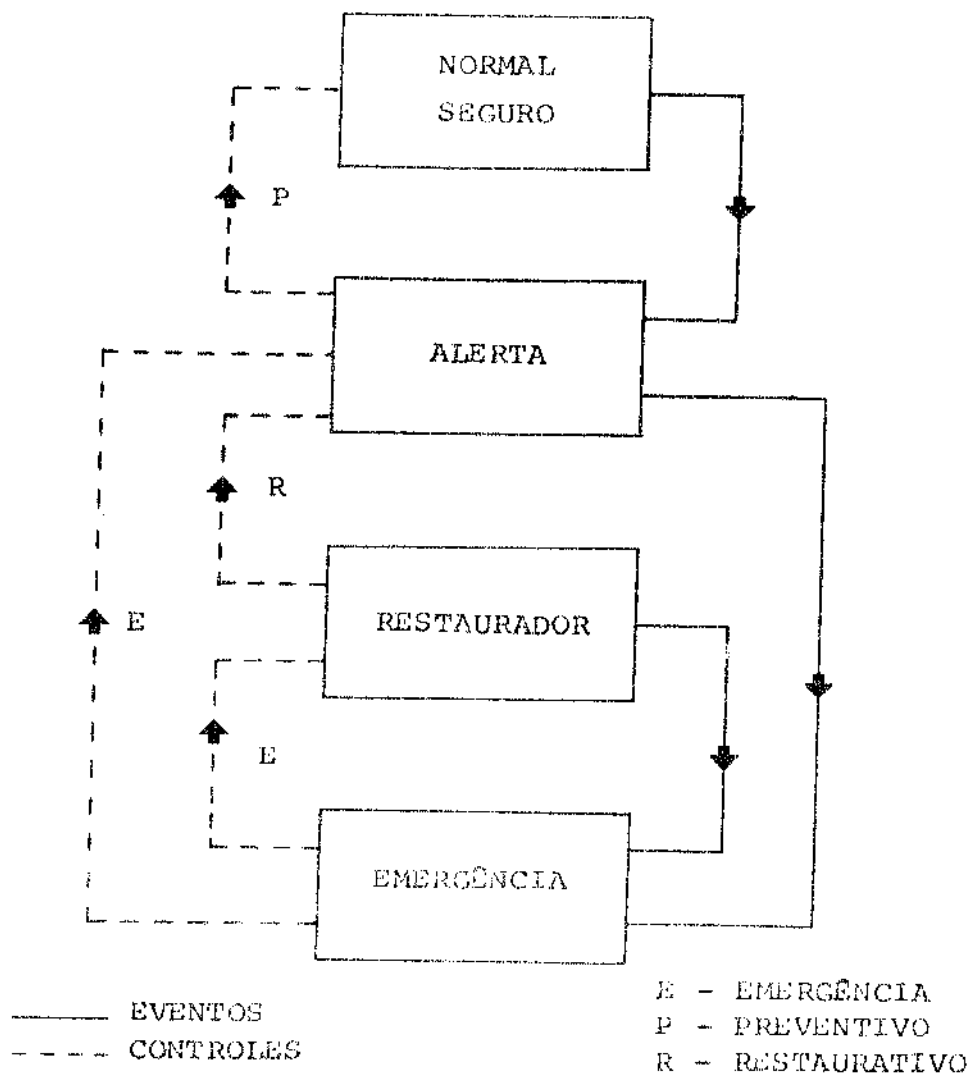


Fig. 2.1 - Transições entre estados

Os EVENTOS podem ser oriundos de variações acentuadas da demanda, perdas de unidades geradoras ou de quaisquer outros componentes do sistema, ações de controle inadequadas, etc...

Os CONTROLES podem ser classificados [11] em:

- Controles Preventivos, correspondendo à transição entre os estados: Alerta e Normal Seguro, e,
- Controles Corretivos, referentes às demais transições.

Em ambos, o objetivo primordial é encontrar meios práticos e factíveis de se remediar condições de operação indesejáveis, tais como:

- No estado de Alerta tornar o sistema seguro.
- No estado de Emergência aliviar as violações das restrições de operação.
- No estado Restaurador atender as cargas perdidas.

2.4.4. Interface entre otimização e segurança

Quando certas ações de controle são requeridas para manter ou atingir um nível de segurança especificado, é desejável minimizar todas as consequências oriundas de tais ações, tanto corretivas como preventivas.

Determinar se um sistema inseguro pode ser levado a um estado de operação seguro, é resolver um problema de otimização restringida, onde o objetivo é obter a melhor condição de operação que satisfaça não somente as restrições de carga e as de operação, mas também as restrições de segurança.

Uma formulação matemática que exprime o problema acima em termos de igualdade e desigualdades, é a seguinte:

Minimizar

$$f(\underline{x}, \underline{y}) \quad \text{função objetivo} \quad (2.12)$$

sujeita a

$$\begin{aligned} \underline{q}(\underline{x}, \underline{y}) &= 0 && \text{restrições de carga} \\ \underline{h}(\underline{x}, \underline{y}) &\geq 0 && \text{restrições de operação} \\ \underline{s}(\underline{x}, \underline{y}) &\geq 0 && \text{restrições de segurança} \end{aligned} \quad (2.13)$$

onde

f é uma função escalar.

$\underline{q}$, $\underline{h}$ e $\underline{s}$ são funções vetores.

$\underline{x}$ é o vetor das variáveis dependentes.

$\underline{y}$ é o vetor das variáveis independentes.

O ponto solução $(\underline{x}_0, \underline{y}_0)$ onde todas as restrições são satisfeitas e, o valor da função $f(\underline{x}, \underline{y})$ é um mínimo, corresponde ao estado de operação normal, seguro e por exemplo: econômico. Porém, quando as restrições de segurança $\underline{s}(\underline{x}, \underline{y}) \geq 0$ estão violadas, o propósito da otimização é determinar os controles preventivos apropriados e, se algumas das restrições de operação $\underline{h}(\underline{x}, \underline{y}) \geq 0$ também estão violadas, o objetivo primário passa a ser a recuperação rápida do sistema, ou seja, sair da condição de emergência. Por outro lado, no estado Restaurador, quando algumas cargas já foram "cortadas" para aliviar uma condição de emergência, a otimização é orientada para a recuperação da carga total no menor tempo possível.

Assim sendo, o objetivo da otimização e o modelo do circuito ambos representados pelas equações (2.12) e (2.13), podem ser diferentes para cada aplicação específica. Tal seleção depende também dos dados do sistema disponíveis, das técnicas empregadas na avaliação da segurança e das políticas operacionais estabelecidas.

CAPÍTULO III

MÉTODO DOMMEL - TINNEY |1|

3.1. Introdução

Com os avanços da computação, tanto analógica como digital, o programa de fluxo de carga foi se caracterizando como uma importante ferramenta para o planejamento, o projeto e a operação dos sistemas elétricos de potência.

Aperfeiçoamentos introduzidos no método de Newton |13|, possibilitaram a obtenção mais rápida das soluções do fluxo de carga para uma gama maior de problemas, inclusive alguns que não podiam ser resolvidos por métodos precedentes (p. ex., GAUSS-SEIDEL).

A aplicação de técnicas de esparsidade |13| tornou o método de Newton aplicável a sistemas de dimensões da ordem de 500 barras, com sensível redução nos requisitos de memória e tempo computacionais, o que motivou o desenvolvimento de métodos de cálculo de fluxo de carga ótimo que incorporassem tais técnicas.

Nesse sentido, uma primeira tentativa |14| foi a solução de uma versão simplificada do problema geral: minimização das perdas de transmissão pela seleção adequada das produções de potência reativa e das derivações (tap's) dos transformadores, sendo que o método utilizado foi basicamente do tipo gradiente de primeira ordem.

A solução para o problema geral do fluxo de carga ótimo, envolvendo sistemas de 500 barras, foi apresentada por Dommel-Tinney na ref. |1|, através de um método prático que resolve o problema do fluxo de carga com variáveis de controle (potência ativa e reativa, derivações de transformadores, etc.) automaticamente ajustadas para minimizar custos ou perdas instan-

tâneas. O resultado é factível com respeito às restrições nestas variáveis e nas variáveis dependentes (tensões nas barras de carga, fontes de reativos, etc.).

Trata-se de um método direto, ou seja, fundamentado na busca da solução ótima por manipulação das equações do problema de otimização original, e não de um problema transformado, obtido por exemplo, pela aplicação das condições de Kuhn-Tucker [16] (família dos métodos indiretos).

Uma vez que o método Dommel-Tinney se baseia em soluções sucessivas do fluxo de carga através do algoritmo de Newton (também conhecido por Newton-Raphson), é conveniente estabelecer algumas convenções e descrever este algoritmo antes de abordar o método em estudo.

3.2. Convenções

a) A cada uma das N barras de um sistema, são associadas as quatro variáveis:

V_k - magnitude da tensão nodal (barra k);

θ_k - ângulo da tensão nodal;

P_k - injeção líquida de potência ativa;

Q_k - injeção líquida de potência reativa.

As injeções de potência são positivas quando entram na barra:



Fig. 3.1 - Convenção das injeções de potência

Obs.: Por injeção líquida deve-se entender como sendo a potência gerada menos a potência consumida.

b) Dependendo de quais das quatro variáveis nodais são especificadas, a barra k pode pertencer a um dos conjuntos:

PQ - conjunto das barras de carga com N_{PQ} elementos;

PV - conjunto das barras de tensão controlada com N_{PV} elementos;

SL - conjunto das barras de folga (slack) com N_{SL} elementos.

A definição de cada conjunto com relação às variáveis citadas no item a) , está expressa na tabela 3.1.

	V	θ	P	Q
PQ	I	I	E	E
PV	E	I	E	I
SL	E	E	I	I

E - especificada

I - incôgnita

Tabela 3.1 - Definição dos conjuntos de barras

c) A uma barra k associa-se os conjuntos:

Ω - conjunto das barras vizinhas à barra k .

K - conjunto das barras vizinhas à barra k , incluindo ela própria.

α - conjunto das barras PQ vizinhas à barra k .

σ - conjunto das barras PV vizinhas à barra k .

d) A cada uma das linhas do sistema, são associadas as variáveis:

I_{kl} - corrente

P_{kl} - fluxo de potência ativa

Q_{kl} - fluxo de potência reativa

A convenção de sinais para estas grandezas, está na figura 3.2.

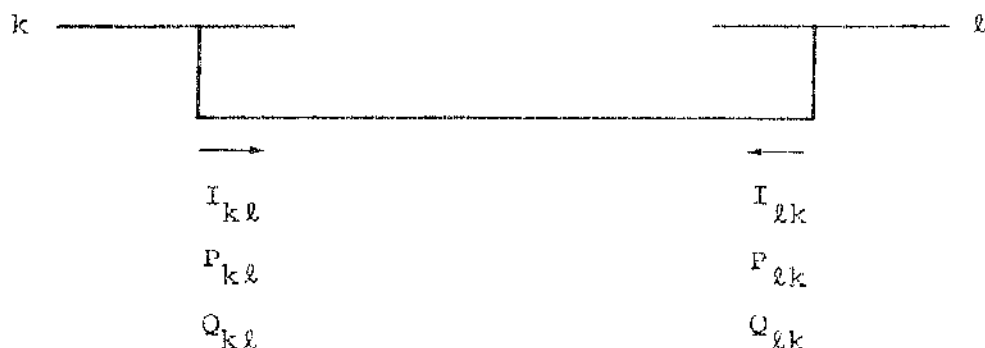


Fig. 3.2 - Convenção positiva para os fluxos de potência e de corrente

e) Os vetores são representados por letras sublinhadas e as matrizes por letras maiúsculas ou entre colchetes.

3.3. Fluxo de Carga Newton-Raphson

As equações do fluxo de carga, que entram no problema do fluxo de carga ótimo na forma de restrições de igualdade, relacionam as variáveis V_k , θ_k , P_k e Q_k da seguinte maneira:

$$P_k = V_k \sum_{l \in K} V_l (G_{kl} \cos \theta_{kl} + B_{kl} \sin \theta_{kl}) \quad (3.1)$$

$$Q_k = V_k \sum_{l \in K} V_l (G_{kl} \sin \theta_{kl} - B_{kl} \cos \theta_{kl}) \quad (3.2)$$

sendo:

$$k = 1, \dots, N \quad (N = \text{nº de barras})$$

$$\theta_{kl} = \theta_k - \theta_l$$

$$Y_{kl} = G_{kl} + j B_{kl}$$

$$Y_{kl} - \text{elemento } (k, l) \text{ da matriz admitância nodal [15]}$$

Resolvidas as equações (3.1) e (3.2), os fluxos nas linhas podem ser calculados através de:

$$P_{kl} = g_{kl} V_k^2 - V_k V_l (g_{kl} \cos \theta_{kl} + b_{kl} \sin \theta_{kl}) \quad (3.3)$$

$$Q_{kl} = -(b_{kl} + bs_{kl}) V_k^2 - V_k V_l (g_{kl} \sin \theta_{kl} - b_{kl} \cos \theta_{kl}) \quad (3.4)$$

sendo:

$$k = 1, \dots, N \quad \text{e} \quad l \in \Omega_k$$

$$g_{kl} = r_{kl} / (r_{kl}^2 + x_{kl}^2) \quad (3.5)$$

$$b_{kl} = -x_{kl} / (r_{kl}^2 + x_{kl}^2)$$

$$bs_{kl} = 1 / xs_{kl}$$

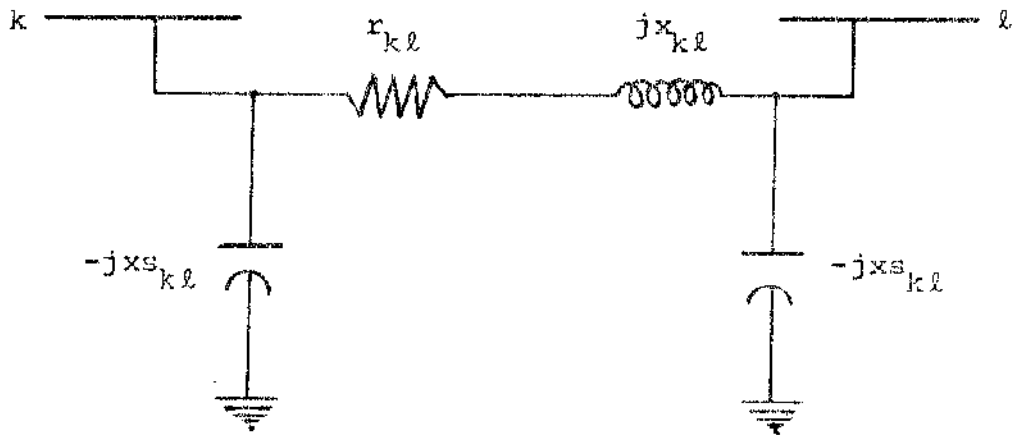


Fig. 3.3 - Circuito π equivalente da linha k-l

Tendo em vista as convenções em 3.2., o sistema de $2N$ equações com $2N$ incógnitas composto pelas equações (3.1) e (3.2), pode ser esquematizado na seguinte forma:

SUBSISTEMAS	EQUAÇÕES	INCÓGNITAS	DIMENSÃO
I	(3.1) $p/ k \in (PQ \cup PV)$	$V_k \ p/ k \in PQ$	$2 \cdot N_{PQ} + N_{PV}$
	(3.2) $p/ k \in PQ$	$\theta_k \ p/ k \in (PQ \cup PV)$	
II	(3.1) $p/ k \in SL$	$P_k \ p/ k \in SL$	$2 \cdot N_{SL} + N_{PV}$
	(3.2) $p/ k \in (PV \cup SL)$	$Q_k \ p/ k \in (PV \cup SL)$	

Tabela 3.2 - Definição dos subsistemas I e II

Como se pode notar, o subsistema I é constituído de equações algébricas não-lineares e assim sendo, procedimentos iterativos (tipo Newton-Raphson) são utilizados para resolvê-lo, além do fato de termos que fixar um ângulo de referência (θ_r) com o intuito de não deixá-lo matematicamente indeterminado, uma vez que em suas equações a variável ângulo se faz presente através de diferenças angulares. Com a sua solução, tem-se os ângulos e as magnitudes das tensões de todas as barras e deste modo a obtenção das demais incógnitas é trivial uma vez que estas estão explicitadas na parte esquerda das equações que compõem o subsistema II.

As variáveis envolvidas no subsistema I podem ser agrupadas em dois vetores:

$\underline{x}$ - vetor das incógnitas e
 $\underline{y}$ - vetor das variáveis especificadas.

As componentes do vetor $\underline{x}$ são:

θ_k com $k \in (PQ \cup PV)$ e
 V_k com $k \in PQ$.

As componentes do vetor $\underline{y}$ são:

θ_k com $k \in SL$;
 V_k com $k \in (PV \cup SL)$;
 P_k com $k \in (PV \cup PQ)$ e
 Q_k com $k \in PQ$.

Assim, o subsistema I pode ser expresso na forma:

$$\underline{g}(\underline{x}, \underline{y}) = \underline{0} \quad (3.6)$$

Este sistema de equações é resolvido iterativamente pelo método de Newton [15, 17], sendo o vetor $\underline{x}$ incrementado sucessivamente através de:

$$\underline{x}^{v+1} = \underline{x}^v + \Delta \underline{x} \quad (3.7)$$

O vetor de correções $\Delta \underline{x}$ é obtido resolvendo-se o sistema linear:

$$J^v \Delta \underline{x} = -\underline{g}(\underline{x}^v, \underline{y}) \quad (3.8)$$

com a matriz Jacobiana J^v dada por:

$$J^v = \left[\frac{\partial}{\partial \underline{x}} \underline{g}(\underline{x}^v, \underline{y}) \right] \quad (3.9)$$

Esta matriz tem estrutura simétrica, análoga a da matriz admitância nodal, e como cada uma das N barras se liga somente a algumas outras, ela é altamente esparsa e o seu grau de esparsidade aumenta com a dimensão do sistema. Isto quer dizer que a proporção de elementos nulos na matriz, cresce com o número de barras do sistema.

Durante o processo de solução de (3.6), entre uma iteração e outra, os subsistemas I e II podem sofrer variações como exemplificado a seguir:

No caso de existirem limitações de potência reativa na barra $k \in PV$, torna-se necessário verificar se há violação dos limites e, se isto acontecer, pode-se aplicar a estratégia na qual se fixa Q_k no valor extremo violado e transfere-se a barra k para o conjunto PQ . Na tabela 3.2, tem-se a eliminação da equação (3.2) p/ $k \in PV$ (subsistema II) e o aparecimento de (3.2) p/ $k \in PQ$ (subsistema I), com conseqüentes alterações nas dimensões.

3.4. Fluxo de Carga Ótimo

3.4.1. Definição das variáveis

Algumas variáveis que não aparecem explicitamente no problema do fluxo de carga, conforme a formulação do item 3.3, e que devem ser consideradas no problema do fluxo de carga ótimo, são citadas a seguir.

As injeções líquidas de potência ativa, nas barras em que a quantidade de potência gerada pode ser variada, são desagregadas em duas componentes:

P_{Gk} - componente controlável e

P_{Ck} - componente fixa,

sendo

$$P_k = P_{Gk} + P_{Ck}$$

Embora tanto P_{Gk} como P_{Ck} sejam variáveis independentes, em algumas das barras de geração P_{Gk} pode ser ajustada tendo em vista a minimização de uma função objetivo, o que torna importante esta decomposição.

Por sua vez, as variáveis Q_k das barras PV também são desagregadas em duas componentes:

Q_{Gk} - componente variável e

Q_{Ck} - componente fixa,

sendo

$$Q_k = Q_{Gk} + Q_{Ck}$$

A necessidade de se explicitar a componente Q_{Gk} é que ela está sujeita a limites que não devem ser violados.

A convenção de sinais para as componentes: controlável e fixa, tanto da potência ativa como da potência reativa, é a mesma do item 3.2.

Variáveis controláveis tais como:

- injeções de potência ativa P_{Gk} ,
- derivação de transformador em-fase ou defasador, etc.,

que não apareciam explicitamente no problema do fluxo de carga, agora são inseridas no vetor das variáveis independentes $\underline{y}$, que portanto, deve ser redefinido.

Por conveniência, as componentes do novo vetor $\underline{y}$ são reagrupadas em dois vetores:

$$\underline{y} = \begin{bmatrix} \underline{u} \\ \underline{p} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{array}{l} \text{vetor das variáveis controláveis} \\ \text{vetor dos parâmetros (grandezas fixas)} \end{array}$$

O vetor $\underline{u}$ pode ter como componentes:

- V_k - magnitude da tensão das barras PV;
- P_{Gk} - potência ativa ajustável em barras de geração;
- t_{ik} - derivação variável de transformador.

E o vetor $\underline{p}$ pode conter:

θ_k - ângulo da barra de referência;

P_k - das barras onde a potência ativa não é ajustável;

Q_k - potência reativa das barras PQ.

Deve-se notar que Dommel-Tinney consideram a magnitude da tensão da barra k e PV como variável de controle, em vez da sua componente ajustável de potência reativa (Q_{Gk}), não a incluindo em nenhum dos vetores $\underline{x}$, $\underline{y}$ ou $\underline{p}$, mas podendo calculá-la a partir das variáveis contidas em $\underline{u}$ e $\underline{x}$. O mesmo ocorre com outras variáveis, como p. ex.: fluxos de potência e correntes em linhas de transmissão e transformadores.

As razões pelas quais se prefere considerar como variável de controle a magnitude da tensão V_k e não a injeção de potência reativa Q_{Gk} na barra k e PV, são as seguintes:

- a) Na resolução do fluxo de carga, repetida a cada passo do processo de otimização, as barras que tiverem a potência reativa como variável de controle, serão tratadas como barras e PQ (Q_k especificado) e não como barras e PV (V_k especificado). Isto implica a inclusão da equação correspondente a Q_k , no sistema (3.6), aumentando a sua dimensão.
- b) Normalmente, as limitações em V_k são mais severas que as limitações em Q_{Gk} , uma vez que estas, em boa parte, podem ser modificadas. Citando como exemplo, no problema de planejamento uma violação nos limites de Q_{Gk} pode indicar as capacidades adicionais

de geração de reativos que devem ser instaladas para manter as magnitudes das tensões dentro dos limites especificados.

3.4.2. Conjunto das restrições

- Restrições do circuito

As equações do fluxo de carga, dadas em (3.6), entram no problema do fluxo de carga ótimo como restrições de igualdade.

$$g(\underline{x}, \underline{u}, \underline{p}) = \underline{0} \quad (3.10)$$

- Restrições nas variáveis de controle $\underline{u}$

As limitações nestas variáveis são do tipo:

- . limites máximos e mínimos nas tensões das barras PV

$$V_k^{\min} \leq V_k \leq V_k^{\max}$$

- . limites máximos e mínimos nas potências geradas

$$P_{Gk}^{\min} \leq P_{Gk} \leq P_{Gk}^{\max}$$

- . limites máximos e mínimos nas derivações dos transformadores

$$t_{ik}^{\min} \leq t_{ik} \leq t_{ik}^{\max}$$

(em se tratando de transformador defasador, trabalha-se com a abertura angular ϕ_{ik})

A forma geral para as restrições de desi-

gualdade nas variáveis de controle $\underline{u}$ é:

$$\underline{u}^{\min} \leq \underline{u} \leq \underline{u}^{\max}$$

- Restrições funcionais

Em um sistema de potência existem variáveis que podem ser determinadas em função das variáveis dependentes $\underline{x}$, das variáveis de controle $\underline{u}$ e dos parâmetros $\underline{p}$. Elas podem estar sujeitas a restrições denominadas restrições funcionais, exemplificadas a seguir:

- . limites máximos e mínimos nas componentes controláveis das injeções de potência reativa.

$$Q_{Gk}^{\min} \leq Q_{Gk} \leq Q_{Gk}^{\max}$$

- . limites máximos e mínimos nos fluxos de potência ativa ou de corrente.

$$P_{kl}^{\min} \leq P_{kl} \leq P_{kl}^{\max}$$

$$I_{kl}^{\min} \leq I_{kl} \leq I_{kl}^{\max}$$

- . limites máximos e mínimos nas magnitudes das tensões das barras PQ

$$V_k^{\min} \leq V_k \leq V_k^{\max}$$

(este é um caso particular em que as restrições afetam diretamente as variáveis dependentes $\underline{x}$)

A forma geral das restrições funcionais é:

$$\underline{h}(\underline{x}, \underline{u}, \underline{p}) \leq \underline{0} \quad (3.11)$$

3.4.3. Função objetivo

A função objetivo a ser minimizada, é do tipo $f(\underline{x}, \underline{u})$ e pode representar os custos de geração, as perdas do sistema ou ser uma outra função convenientemente definida. Dependendo da função objetivo adotada, o programa do fluxo de carga ótimo pode ser adaptado para outras aplicações como, por exemplo, a determinação de estratégias de controle em situações de emergência. Maiores detalhes a respeito de funções objetivo e respectivas aplicações, estão descritos no capítulo precedente.

3.4.4. Formulação do problema sem restrições de desigualdade

Segundo o procedimento utilizado por Dommel-Tinney em [1], será apresentado inicialmente, o algoritmo para a solução do problema do fluxo de carga ótimo, que considera apenas as restrições de igualdade, ou seja, as próprias equações do fluxo de carga expressas em (3.6). Demais restrições serão introduzidas posteriormente.

O problema se resume em:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & f(\underline{x}, \underline{u}) \\ & \underline{u} \end{aligned} \tag{3.12}$$

sujeito a

$$g(\underline{x}, \underline{u}, \underline{p}) = \underline{0}$$

podendo ser transformado, através da construção da função de Lagrange $L(\underline{x}, \underline{u}, \underline{\lambda})$, em um problema não restringido:

$$L(\underline{x}, \underline{u}, \underline{p}, \underline{\lambda}) = f(\underline{x}, \underline{u}) + \underline{\lambda}^t \cdot \underline{g}(\underline{x}, \underline{u}, \underline{p}) \quad (3.13)$$

sendo $\underline{\lambda}$ o vetor dos multiplicadores de Lagrange.

As condições necessárias de mínimo (condições de primeira ordem) são:

$$\underline{L}_x = \underline{f}_x + [\underline{g}_x]^t \cdot \underline{\lambda} = \underline{0} \quad (3.14)$$

$$\underline{L}_u = \underline{f}_u + [\underline{g}_u]^t \cdot \underline{\lambda} = \underline{0} \quad (3.15)$$

$$\underline{L}_\lambda = \underline{g}(\underline{x}, \underline{u}, \underline{p}) = \underline{0} \quad (3.16)$$

sendo:

$$\underline{L}_x = \frac{\partial L}{\partial \underline{x}} \quad \underline{L}_u = \frac{\partial L}{\partial \underline{u}} \quad \underline{L}_\lambda = \frac{\partial L}{\partial \underline{\lambda}}$$

$$\underline{f}_x = \frac{\partial f}{\partial \underline{x}} \quad \underline{f}_u = \frac{\partial f}{\partial \underline{u}}$$

$$\underline{g}_x = \frac{\partial \underline{g}}{\partial \underline{x}} \quad \underline{g}_u = \frac{\partial \underline{g}}{\partial \underline{u}}$$

Em (3.14) aparece a matriz Jacobiana transposta e a equação (3.16) é a própria equação (3.6).

O vetor $\underline{L}_u$ é o gradiente reduzido como mostrado a seguir:

- Considere-se o diferencial df da função $f(\underline{x}, \underline{u})$.

$$df = \underline{f}_u^t d\underline{u} + \underline{f}_x^t d\underline{x} \quad (3.17)$$

- Uma vez que as variações em $d\underline{u}$ e $d\underline{x}$ não são independentes, pois a relação (3.6) deve ser obedecida, pode-se colocar (3.6) na forma diferencial.

$$[\underline{g}_x] d\underline{x} + [\underline{g}_u] d\underline{u} = \underline{0} \quad (3.18)$$

- Obtendo $d\underline{x}$ em função de $d\underline{u}$ a partir de (3.18) e inserindo em (3.17), obtêm-se df em função de $d\underline{u}$.

$$df = \left(\underline{f}_u^t - \underline{f}_x^t [\underline{g}_x]^{-1} [\underline{g}_u] \right) d\underline{u} \quad (3.19)$$

- Pela própria definição de diferencial total, o que está entre chaves em (3.19), é o transposto do gradiente reduzido. Por outro lado, obtendo $\underline{\lambda}$ em (3.14) e substituindo em (3.15):

$$\underline{L}_u = \underline{f}_u - [\underline{g}_u]^t \left([\underline{g}_x]^t \right)^{-1} \underline{f}_x \quad (3.20)$$

- Confrontando-se (3.20) com (3.19) e aplicando as operações básicas de transposição de matrizes, comprova-se a relação:

$$\underline{L}_u = \underline{g}_r^t f \quad (\text{gradiente reduzido})$$

Desta forma, incrementos no vetor das variáveis de controle $\underline{u}$, $\delta \underline{u}$, na direção do gradiente reduzido $\underline{L}_u$, obedecem as restrições impostas pelas equações do fluxo de carga na forma linearizada (3.18). Notar que o vetor $\underline{f}_u$ dá a direção de maior variação da função f em relação às variações no vetor $\underline{u}$, mas não pode ser utilizado porque ignora as restrições de igualdade (3.6).

Tendo estabelecido o problema não restringido, o algoritmo para a solução do problema do fluxo de carga ótimo, sem restrições de desigualdade, matematicamente expresso pelas equações (3.14) a (3.16), é dado a seguir:

- (i) Escolher um valor inicial para o vetor das variáveis independentes $\underline{u}$.
- (ii) Com $\underline{u}$ e $\underline{p}$ compondo o vetor de variáveis independentes $\underline{y}$, resolver o problema do fluxo de carga pelo método de Newton, determinando-se o vetor das variáveis dependentes $\underline{x}$. Obter, para a solução encontrada, a matriz Jacobiana e os seus fatores triangulares.
- (iii) Resolver o sistema linear (3.14), de forma a obter $\underline{\lambda}$.

$$\underline{\lambda} = - \left(\begin{bmatrix} \underline{g}_x \end{bmatrix}^t \right)^{-1} \cdot \underline{f}_x \quad (3.21)$$

Isto é feito a partir dos fatores triangulares da matriz $\begin{bmatrix} \underline{g}_x \end{bmatrix}$ obtidos em (ii).

- (iv) Calcular o gradiente reduzido $\underline{L}_u$, a partir do $\underline{\lambda}$ calculado no item anterior.

$$\underline{L}_u = \underline{g}^T f = \underline{f}_u + \underline{g}_u^T \cdot \underline{\lambda} \quad (3.22)$$

- (v) Testar a convergência do processo de otimização, verificando se $|\underline{L}_u|$ é suficientemente pequeno.
- (vi) Se não for obtida a convergência, calcular novos valores para as variáveis de controle:

$$\begin{aligned} \underline{u}^{\text{novo}} &= \underline{u}^{\text{velho}} + \Delta \underline{u} \\ \Delta \underline{u} &= -c \cdot \underline{g}^T f \end{aligned} \quad (3.23)$$

- (vii) Retornar ao passo (ii).

De todos, o mais crítico é o passo (vi) porque depende do fator c que influi no passo exploratório. Mais adiante, no método denominado Gradiente Ôtimo, é descrito um método de obtenção de c .

3.4.5. Inclusão das restrições nas variáveis de controle

As restrições nas variáveis de controle $\underline{u}$, dadas em 3.4.2., podem ser inseridas facilmente no algoritmo apresentado em 3.4.4.

Duas situações devem ser consideradas:

- a) Quando as correções $\Delta \underline{u}$, calculadas em (3.23), acarretam violações de limites em algumas das variáveis de controle. A figura 3.4 ilustra esta situação.

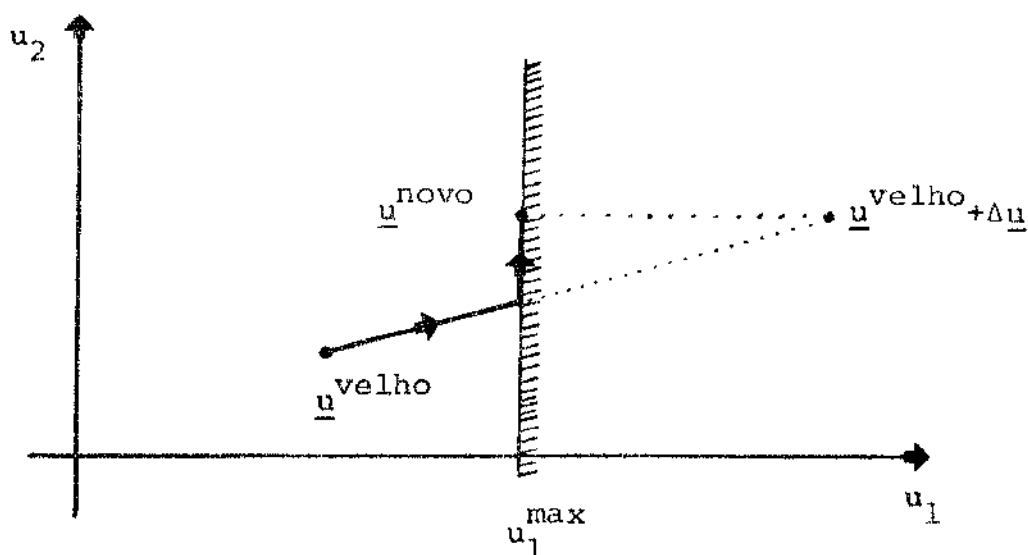


Fig. 3.4 - Violação de limite em variável de controle

De acordo com a ilustração, os novos valores são dados por:

$$u_i^{\text{novo}} = \begin{cases} u_i^{\max} & , \text{ se } (u_i^{\text{velho}} + \Delta u_i) > u_i^{\max} \\ u_i^{\min} & , \text{ se } (u_i^{\text{velho}} + \Delta u_i) < u_i^{\min} \\ u_i^{\text{velho}} + \Delta u_i & , \text{ se não ocorrer os anteriores} \end{cases} \quad (3.24)$$

- b) Quando já existem variáveis em seus limites máximos ou mínimos, e as correções Δu devem ser feitas em uma direção factível (figura 3.5).

Esta situação é resolvida pela técnica do gradiente projetado que fornece a direção factível em que ocorre a máxima variação na função objetivo. No caso específico das restrições nas variáveis de con-

trole, o cálculo é imediato e a direção factível de máxima variação é dada por:

$$r_i = \begin{cases} 0, & \text{se } \text{gr } f_i < 0 \text{ e } u_i = u_i^{\max} \\ 0, & \text{se } \text{gr } f_i > 0 \text{ e } u_i = u_i^{\min} \\ -\text{gr } f_i, & \text{se não ocorrer os anteriores} \end{cases} \quad (3.25)$$

sendo $\text{gr } f_i$ a componente i do vetor $\underline{\text{gr } f}$.

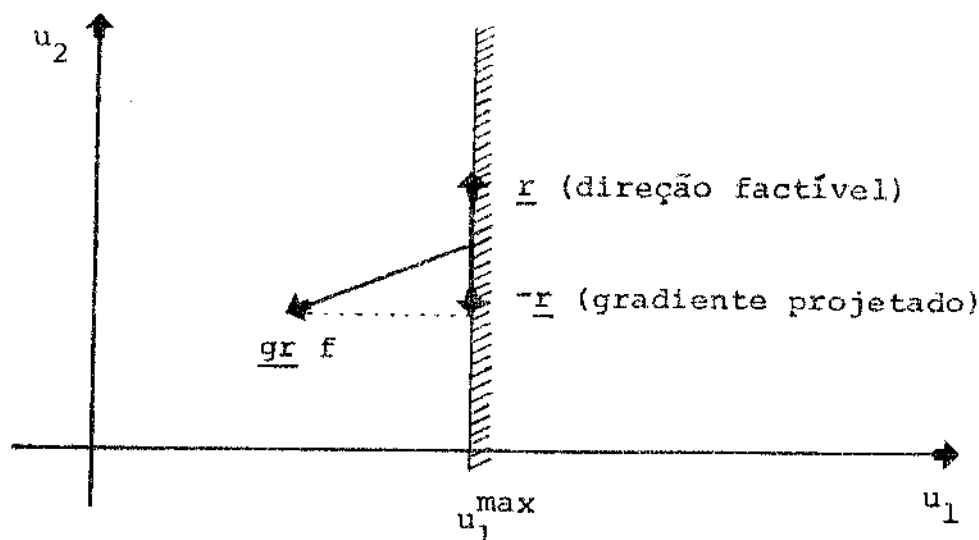


Fig. 3.5 - Determinação da direção factível

Desta forma, o vetor $\Delta \underline{u}$ de (3.23), passa a ser dado por:

$$\Delta \underline{u} = c \cdot \underline{r} \quad (3.26)$$

Deve-se notar que, mesmo quando o limite de uma variável de controle u_1 está violado, a componen

te $\text{gr } f_i$ do gradiente reduzido deve ser calculada nas iterações seguintes, pois eventualmente pode haver retorno para o interior da região factível, ou seja, sair do limite.

Isto ocorre se:

$$\text{gr } f_i > 0 \quad \text{e} \quad u_i = u_i^{\max}$$

ou

$$\text{gr } f_i < 0 \quad \text{e} \quad u_i = u_i^{\min}$$

3.4.6. Inclusão das restrições funcionais

Dentre os vários procedimentos para o tratamento das restrições funcionais, Dommel-Tinney as incluem na função objetivo via funções penalidades.

A função objetivo com penalidades passa a ser:

$$f_p = f(\underline{x}, \underline{u}) + \sum w_j \quad (3.27)$$

com

$$w_j = \begin{cases} s_j \cdot h_j^2(\underline{x}, \underline{u}, p), & \text{se } h_j(\underline{x}, \underline{u}, p) > 0 \\ 0, & \text{se } h_j(\underline{x}, \underline{u}, p) \leq 0 \end{cases} \quad (3.28)$$

s_j - fator de penalidade

Um caso particular importante, é o das restrições de desigualdade nas variáveis dependentes $\underline{x}$,

para as quais tem-se:

$$w_j = \begin{cases} s_j (x_j - x_j^{\max})^2 & , \text{ se } x_j > x_j^{\max} \\ s_j (x_j - x_j^{\min})^2 & , \text{ se } x_j < x_j^{\min} \\ 0 & , \text{ se } x_j^{\min} \leq x_j \leq x_j^{\max} \end{cases} \quad (3.29)$$

A figura 3.6 ilustra o que ocorre com a introdução de penalidades. A medida que o fator de penalidade s cresce, o mínimo da função objetivo (3.27) mais se aproxima da solução do problema restringido.

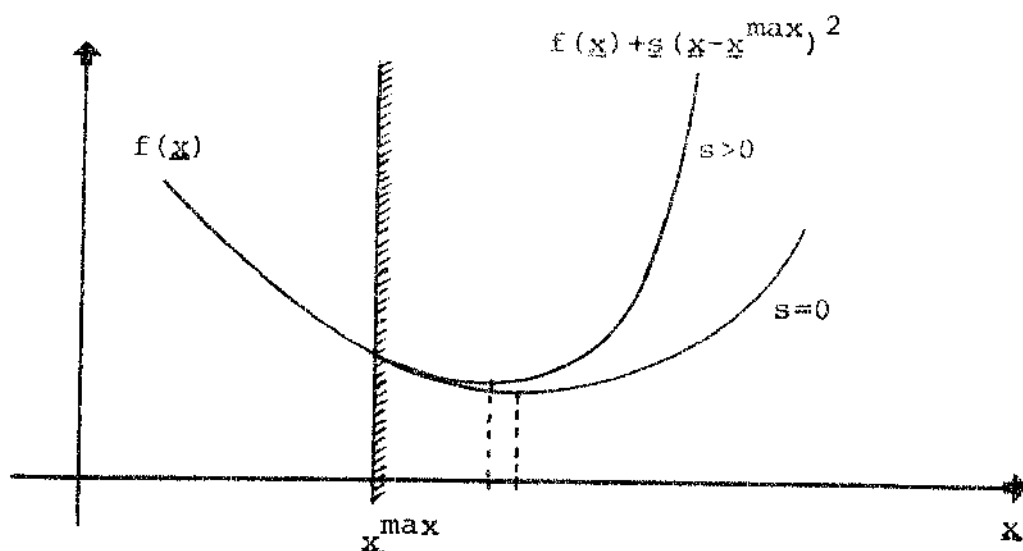


Fig. 3.6 - Função objetivo com penalidades

Dommel-Tinney optaram pelo método de funções penalidades por três razões:

- a) Restrições funcionais raramente são limites rígidos no sentido estritamente matemático,

ou seja, $V \leq 1.0$ pu numa barra PQ, na realidade, significa que V não deve exceder em demasia este valor limite, isto é, $V = 1.01$ pu pode ser permissível. O método de penalidades é compatível com esta flexibilidade.

- b) A sua aplicação implica em muito poucas alterações do algoritmo, bastando adicionar termos em $\frac{\partial f}{\partial \underline{x}}$ e em $\frac{\partial f}{\partial \underline{u}}$ caso a restrição funcional seja também função de $\underline{u}$.
- c) Este método contribui para a obtenção de soluções factíveis do fluxo de carga, com as penalidades indicando os pontos críticos onde limites rígidos impediriam a convergência.

Por exemplo:

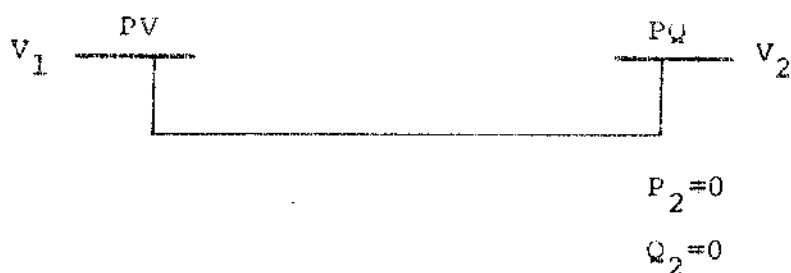


Fig. 3.7 - Linha longa sem carga

É um caso típico onde pode ocorrer $V_2 > V_2^{\max}$ mesmo quando $V_1 = V_1^{\min}$ e portanto, um limite rígido para V_2 excluirá a possibilidade de uma solução, o que não acontece com o método de penalidades.

Entretanto, há dificuldades para o seu bom desempenho, salientando-se a mais crítica de todas: a determinação do fator de penalidade s .

Se s for grande, a violação do limite será pequena, mas podem surgir problemas de convergência. Por outro lado, se s for pequeno, os problemas de convergência desaparecem, mas é possível se obter soluções com violações inaceitáveis.

Dommel-Tinney recomendam uma inicialização com valores pequenos de s e que sejam aumentados durante o processo de otimização. Porém, não sugerem uma estratégia específica de controle da variação de s durante a otimização.

3.5. Gradiente Reduzido

O gradiente reduzido é calculado através da equação (3.22), tendo-se em mente que em todos os casos que ocorrer violação nas restrições funcionais, deve-se utilizar a função objetivo com penalidades (f_p) dada em (3.27).

Dommel-Tinney consideram as seguintes variáveis de controle:

- magnitudes das tensões nas barras PV;
- potência ativa gerada, nas barras onde ela pode ser ajustada;
- derivação de transformador em fase e de transformador defasador.

Com base na função objetivo f_p , as componentes do gradiente para estes três tipos de variáveis de controle, são as seguintes:

- Tensão controlada

$$\frac{\delta f_p}{\delta V_k} = \frac{1}{V_k} \left[z N_{1k} + \sum_{m \in K} \lambda_{Pm} N_{mk} + \sum_{m \in \alpha} \lambda_{Qm} L_{mk} \right] + \sum \frac{\partial w_j}{\partial V_k} \quad (3.30)$$

sendo

$$z = \begin{cases} \frac{d K_{SL}}{d P_{GSL}} & - \text{no caso de fluxo ótimo de potência} \\ & \text{ativa e reativa} \\ 1 & - \text{no caso de fluxo ótimo de potência} \\ & \text{reativa} \end{cases}$$

K_{SL} - custo da geração de P_{GSL}

P_{GSL} - potência ativa gerada na barra de folga (slack)

- Potência ativa gerada

$$\frac{\delta f}{\delta P_{GSL}} = \frac{d K_{SL}}{d P_{GSL}} + \sum \frac{\partial w_j}{\partial P_{GSL}} \quad (3.31)$$

$$\frac{\delta f}{\delta P_{Gk}} = \frac{d K_k}{d P_{Gk}} - \lambda_{Pk} + \sum \frac{\partial w_j}{\partial P_{Gk}}$$

sendo

K_k - custo da geração de P_{Gk}

P_{Gk} - potência ativa gerada na barra k

- Tap de transformador

$$\begin{aligned} \frac{\delta f_p}{\delta t_{ik}} = & \frac{1}{t_{ik}} (a_i N_{ik} + b_i H_{ik} + a_k N_{ki} + b_k H_{ki}) + \\ & + 2 V_k^2 (b_k B_{ik} - a_k G_{ik}) + \sum \frac{\partial w_j}{\partial t_{ik}} \end{aligned} \quad (3.32)$$

sendo

$$a_i = \begin{cases} z & , \text{ se } i \text{ for slack} \\ \lambda_{Pi} & , \text{ para outros tipos} \end{cases}$$

$$b_i = \begin{cases} \lambda_{Qi} & , \text{ se } i \text{ for PQ} \\ 0 & , \text{ para outros tipos} \end{cases}$$

análogo para a_k e b_k

$$G_{ik} + j B_{ik} = -t_{ik} Y_{ik}$$

t_{ik} - relação de transformação

O transformador entra na matriz admitância nodal, da seguinte maneira:

	coluna i	coluna k
linha i	Y_{ik}	$-t_{ik} Y_{ik}$
linha k	$-t_{ik} Y_{ik}$	$t_{ik}^2 Y_{ik}$

As respectivas deduções das expressões aqui apresentadas, se encontram no Apêndice I.

3.6. Gradiente Ótimo

Na direção factível determinada através de (3.25), a função objetivo com penalidades (3.27) passa a ser $\tilde{f}_p$: função exclusiva da variável escalar c , como ilustra a figura 3.8.

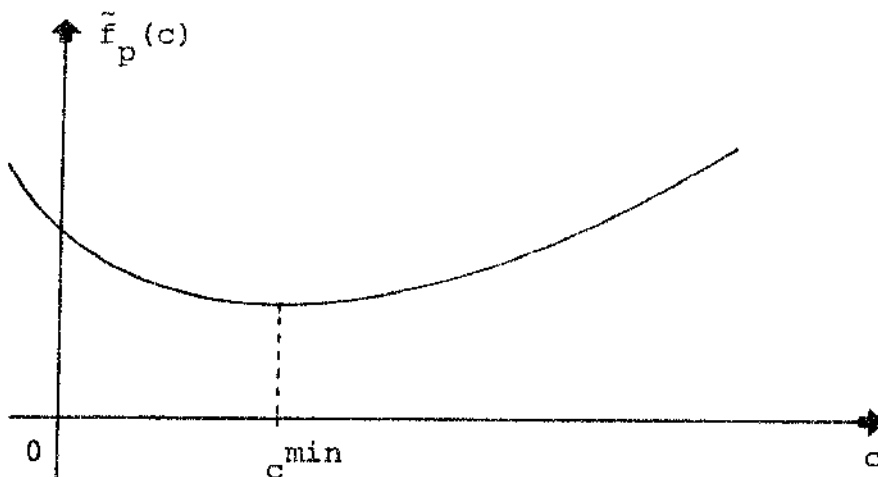


Fig. 3.8 - Busca unidimensional

Gradiente ótimo é um método de obtenção do fator c , cujo valor deverá ser $c^{\min}$ (vide figura 3.8), correspondendo a um respectivo mínimo da função objetivo f_p ao longo da direção dada por $\underline{r}$. Desta forma, as variáveis de controle $\underline{u}$ serão ajustadas através de:

$$\underline{u}^{\text{nov}} = \underline{u}^{\text{velho}} + c^{\min} \cdot \underline{r} \quad (3.33)$$

A figura 3.9 ilustra o que ocorre para um sistema com variáveis de controle ajustadas por meio de (3.33).

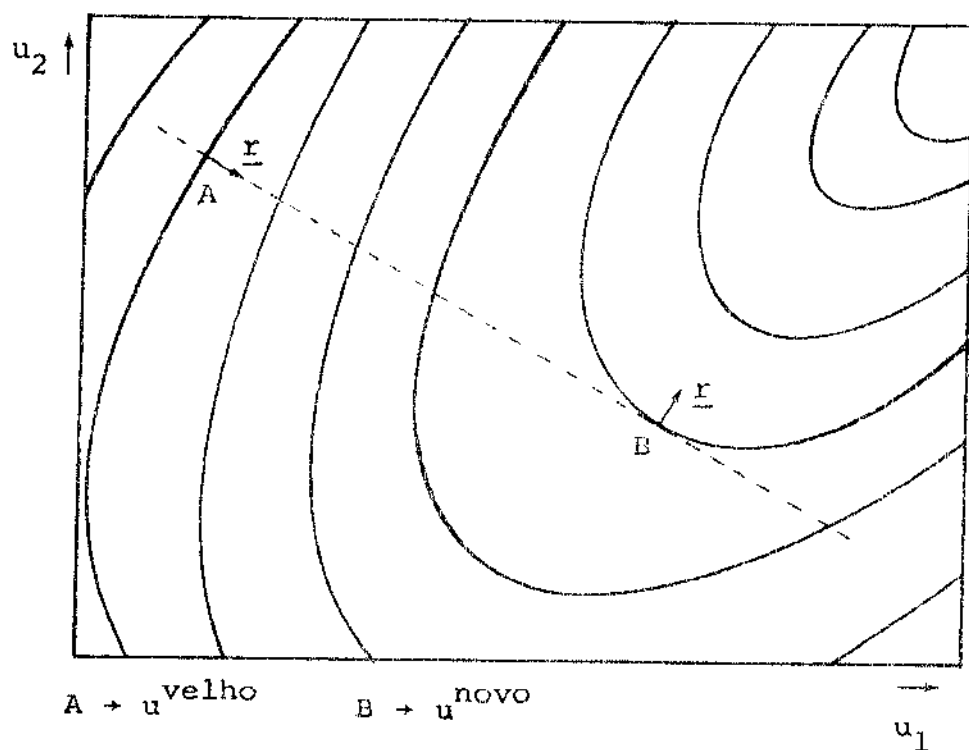


Fig. 3.9 - Gradiente Ótimo

Como já citado anteriormente, a determinação de $c^{\min}$ é um dos pontos críticos do método Dommel-Tinney, os quais sugerem um procedimento que consiste em aproximar a função objetivo $\tilde{f}_p$ por uma função do segundo grau (parábola) do parâmetro c (fig. 3.10).

A parábola é ajustada utilizando-se:

- o valor da função no ponto $c = 0$;
- a derivada em $c = 0$ e
- o valor da função no ponto $c = c_1$.

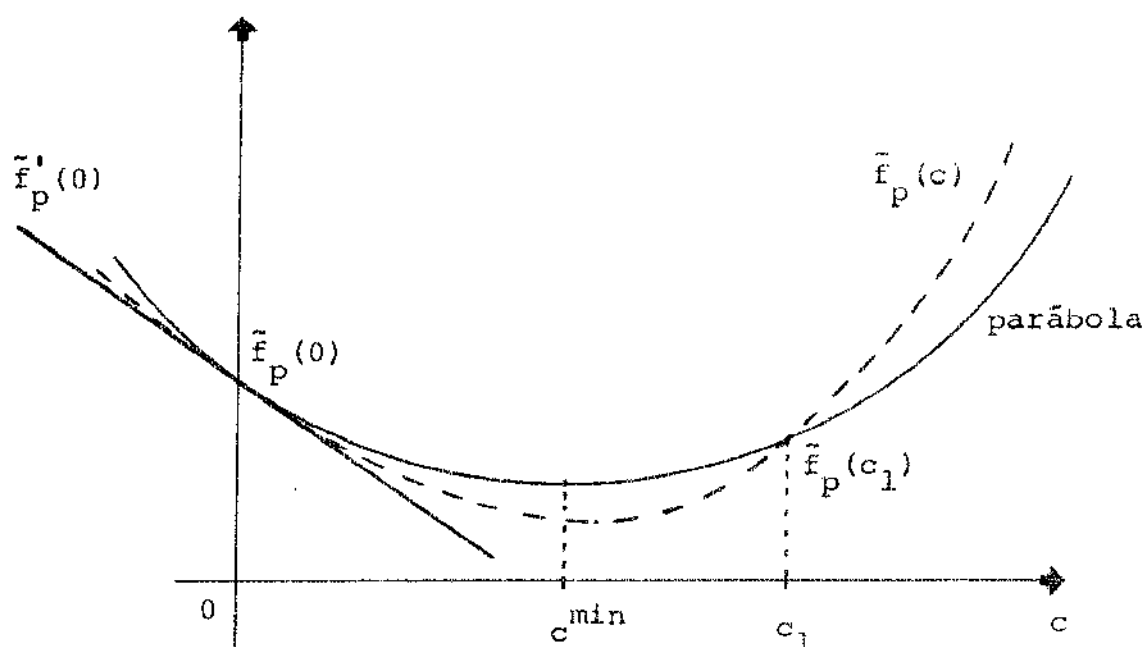


Fig. 3.10 - Aproximação de $\tilde{f}_p$ por uma parábola

Como a solução do fluxo de carga para $c = 0$ já é conhecida, resta calcular a derivada nesse ponto e o valor da função objetivo no ponto $c = c_1$, exigindo uma nova solução do fluxo de carga.

A derivada de $\tilde{f}_p$ no ponto $c = 0$ é dada pelo produto da derivada direcional no ponto A (fig. 3.9) com a magnitude do vetor $\underline{r}$, ou seja:

$$\tilde{f}'_p(0) = \left. \frac{d \tilde{f}_p}{d c} \right|_{c=0} = \underbrace{(\underline{gr} f)_A}_{\text{derivada direcional}} \cdot \frac{\underline{r}}{|\underline{r}|} \cdot |\underline{r}|$$

derivada direcional

$$\tilde{f}'_p(0) = -\underline{r} \cdot \underline{r} = -|\underline{r}|^2 = -\sum r_i^2 \quad (3.34)$$

Tomando a equação da parábola, temos:

$$q(c) = a_1 + a_2 c + a_3 c^2$$

$$q(0) = \tilde{f}_p(0)$$

$$q'(0) = \tilde{f}'_p(0) = -|\underline{r}|^2 \quad (3.35)$$

$$q(c_1) = \tilde{f}_p(c_1)$$

Desta forma, os parâmetros a_i podem ser determinados:

$$a_1 = q(0) = \tilde{f}_p(0)$$

$$a_2 = q'(0) = \tilde{f}'_p(0)$$

$$a_3 = \frac{1}{c_1^2} \cdot [q(c_1) - a_1 - a_2 c_1] \quad (3.36)$$

ou

$$a_3 = \frac{1}{c_1^2} \cdot [\tilde{f}_p(c_1) - \tilde{f}_p(0) - \tilde{f}'_p(0) \cdot c_1]$$

Assim, o ponto de mínimo da parábola é dado por:

$$c^{\min} = -\frac{a_2}{2 \cdot a_3} = \frac{\tilde{f}'_p(0) \cdot c_1^2}{2 \left[\tilde{f}'_p(0) \cdot c_1 + \tilde{f}_p(0) - \tilde{f}_p(c_1) \right]} \quad (3.37)$$

Dois problemas aparecem na aplicação deste procedimento:

- a escolha de valores adequados para c_1 e
- o valor de $c^{\min}$, calculado através de (3.37), que pode ser negativo.

O primeiro problema, apesar de ser uma limitação intrínseca do método, pode ser contornado parcialmente pois existe uma faixa razoável de valores de c_1 para o qual o processo converge adequadamente (Cap. IV de [4]). O valor de c_1 define o tamanho (α) do passo exploratório dado na direção factível:

$$\alpha = c_1 \cdot |\underline{r}| \quad (3.38)$$

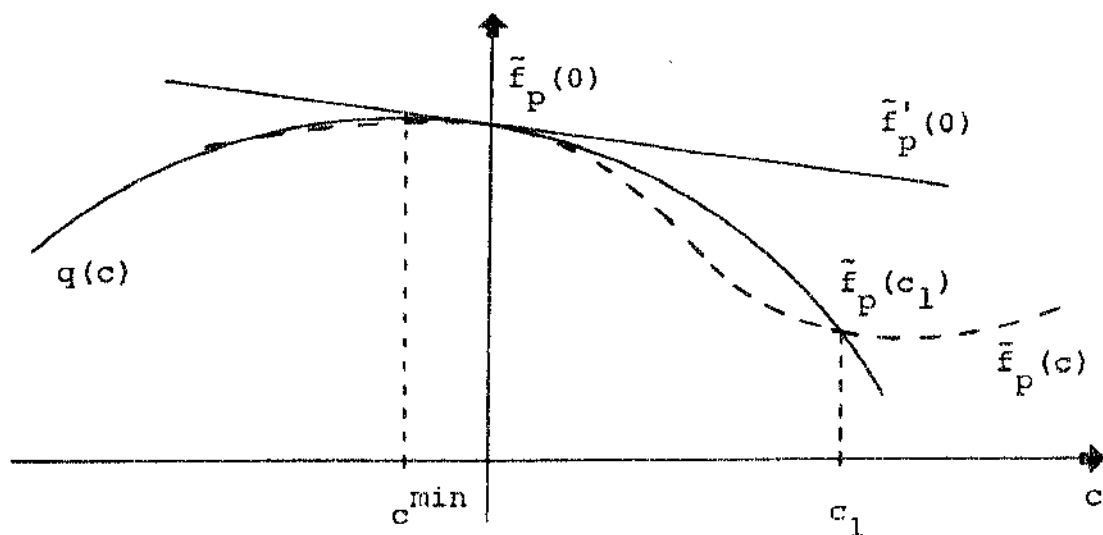


Fig. 3.11 - Um caso em que a aproximação parabólica resulta em $c^{\min}$ negativo

O segundo problema, peculiar a situações como a ilustrada na figura 3.11 ou, onde o passo exploratório é muito pequeno em relação à curvatura da função, pode ser evitado do seguinte modo: sempre que $c^{\min}$ for negativo, ajusta-se uma nova parábola a partir de um novo chute para c_1 (p. ex.: dobra-se o valor atual de α).

Uma vez definida a grandeza α (passo exploratório), cabe aqui, um esclarecimento adicional sobre o cálculo da derivada $\tilde{f}'_p(0)$. Para isso, considere-se as curvas (a) e (b) da figura 3.12.

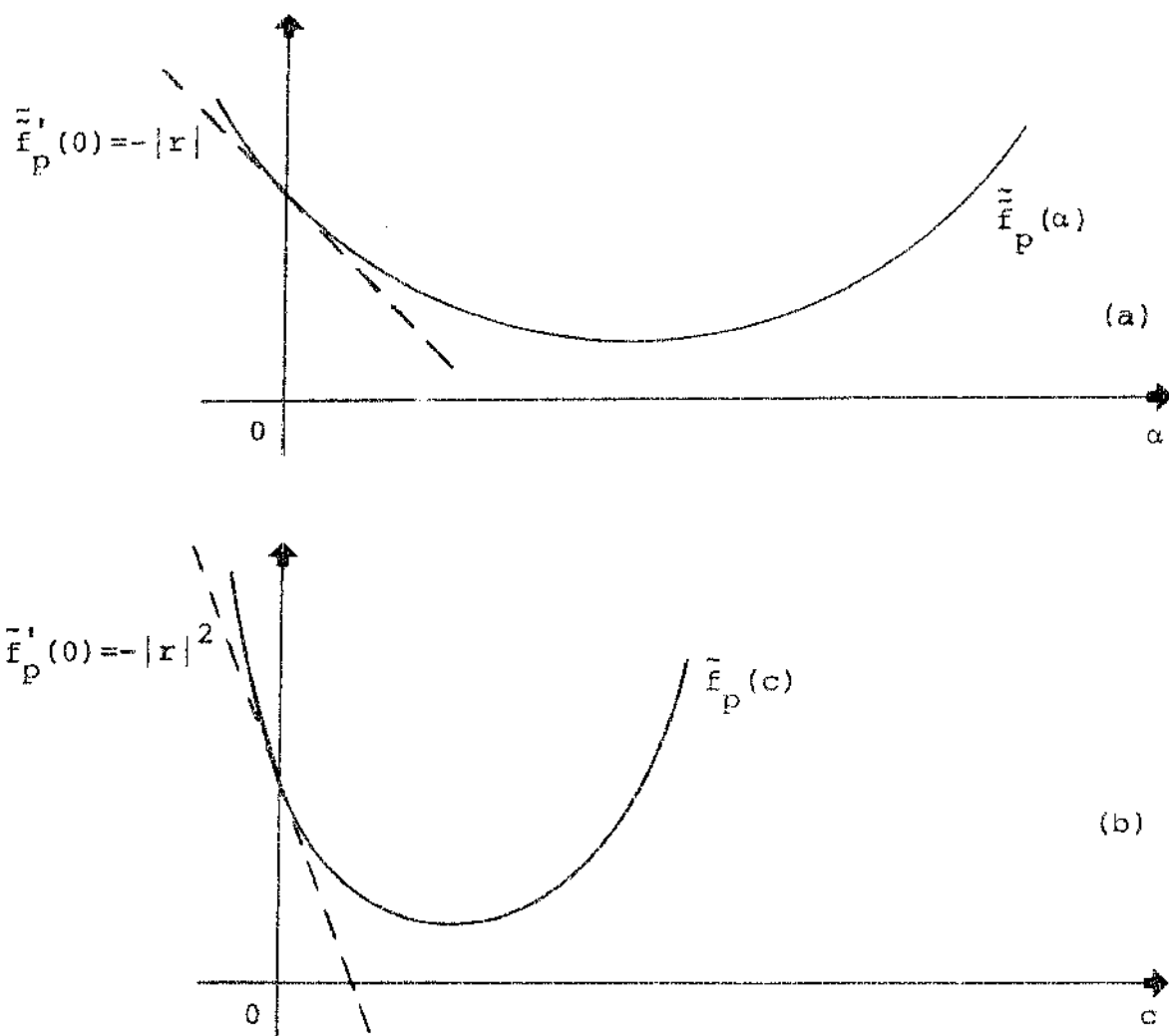


Fig. 3.12 - Função objetivo na direção factível

(a) em função do tamanho do passo (α)

(b) em função do multiplicador de passo (c)

Na curva (a), a derivada no ponto $\alpha = 0$, é a própria derivada direcional, que corresponde ao produto escalar do gradiente reduzido (factível) por um vetor unitário em sentido oposto, ou seja, é a própria magnitude do gradiente, com o sinal negativo:

$$\tilde{f}'_p(0) = \left. \frac{d \tilde{f}_p}{d \alpha} \right|_{\alpha=0} = -|r| \quad (3.39)$$

Na curva (b), a derivada no ponto $c = 0$, pode ser obtida a partir de (3.39), considerando-se a relação entre as variáveis α e c dada em (3.38):

$$\tilde{f}'_p(0) = \left. \frac{d \tilde{f}_p}{d c} \right|_{c=0} = -|r|^2 \quad (3.40)$$

3.7. Interpolação Cúbica

Com o objetivo de se comparar e testar a validade do método de determinação de $c^{\min}$ que aproxima a função objetivo com penalidades ($\tilde{f}_p$) por uma função do segundo grau do parâmetro c (fig. 3.10), implementou-se um outro procedimento para se obter $c^{\min}$, que consiste em se aproximar a função $\tilde{f}_p$ por uma função do terceiro grau (cúbica) do parâmetro c (fig. 3.13).

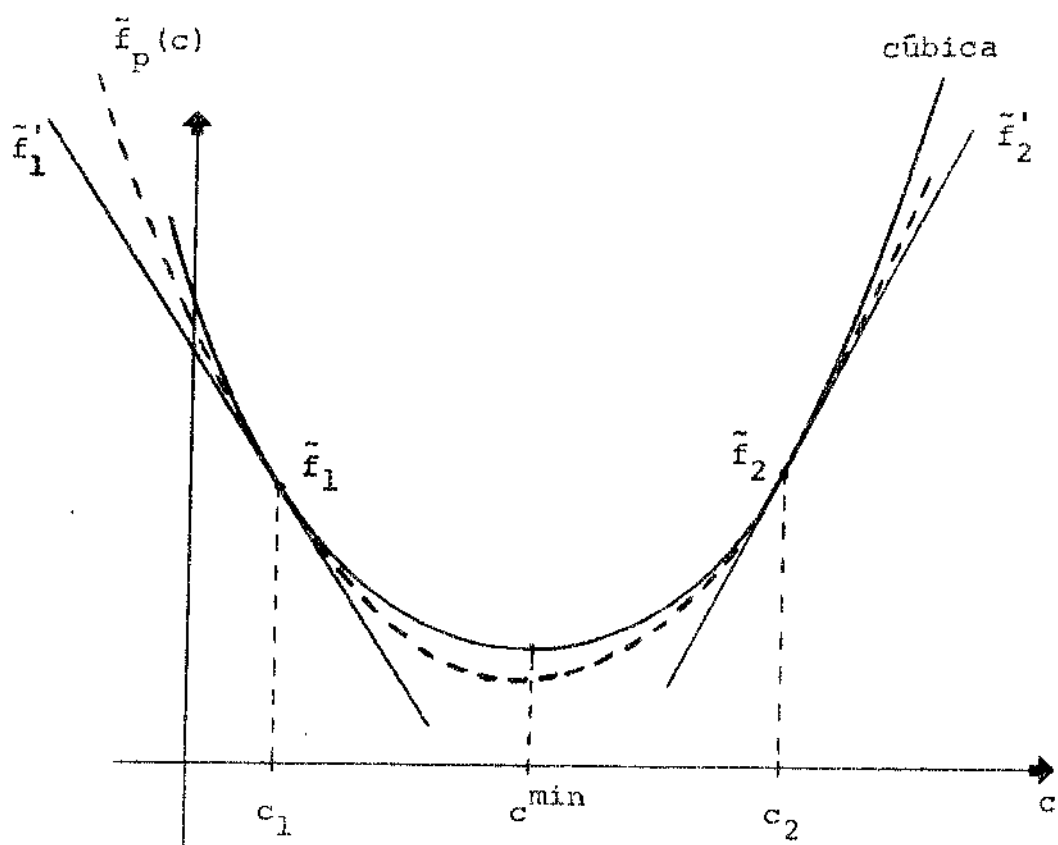


Fig. 3.13 - Aproximação da função objetivo com penalidades ($\tilde{f}_p$) por uma cúbica.

A cúbica é ajustada por meio:

- do valor da função ($\tilde{f}_1$) no ponto $c = c_1$,
- da derivada ($\tilde{f}'_1$) em $c = c_1$,
- do valor da função ($\tilde{f}_2$) no ponto $c = c_2$ e
- da derivada ($\tilde{f}'_2$) em $c = c_2$.

E o valor $c^{\min}$ é dado por [18, pág. 142]:

$$c^{\min} = c_2 - \frac{(c_2 - c_1) (\tilde{f}_2' + A - B)}{\tilde{f}_2' - \tilde{f}_1' + 2A} \quad (3.41)$$

$$A = \sqrt{B^2 - \tilde{f}_1' \cdot \tilde{f}_2'} \quad (3.42)$$

$$B = \tilde{f}_1' + \tilde{f}_2' - \frac{3(\tilde{f}_1' - \tilde{f}_2')}{c_1 - c_2} \quad (3.43)$$

A distribuição dos pontos da fig. 3.13 é obtida de acordo com o seguinte algoritmo:

- a) Solução do fluxo de carga em c_1 .
- b) Obtenção da derivada em c_1 .
- c) Estabelecer passo exploratório para fixar c_2 .
- d) Solução do fluxo de carga em c_2 .
- e) Obtenção da derivada em c_2 .
- f) Se esta derivada for negativa, fazer $c_1 = c_2$ e retornar ao item c). Se for positiva:
- g) Calcular $c^{\min}$.

Este método, apesar de produzir um valor mais preciso de $c^{\min}$ e de não ter o inconveniente de gerar passos para trás ($c^{\min} < 0$), é impraticável pois exige um número excessivo de soluções do fluxo de carga. Ele apenas foi implementado com a finalidade de se ter uma base para comparação com o método descrito em 3.6.

3.8. Hessiano Aproximado

Com o intuito de desenvolver métodos que otimizem uma função o mais rápido possível, que forneçam um ponto solução aceitável, ou seja, suficientemente próximo do ótimo real, satisfazendo algum critério de tolerância e desta forma, evitando o uso de algoritmos com elevada precisão às custas de um excessivo tempo computacional, Dommel-Tinney [1] citam uma versão simplificada do método de segunda ordem que consiste em desprezar os elementos fora da diagonal principal da matriz Hessiana e calcular os elementos diagonais através de:

$$\frac{\delta^2 f}{\delta u_i^2} \approx \frac{\text{variação em } \frac{\delta f}{\delta u_i}}{\text{variação em } u_i} \quad (3.44)$$

com a variação em u_i correspondendo a um pequeno deslocamento exploratório em $\underline{u}$ (vetor das variáveis de controle).

Caso algum elemento obtido por (3.44) resulte negativo, a respectiva variável de controle não é alterada no ciclo correspondente, enquanto que as demais o são, por meio de (3.24) com:

$$\Delta u_i = - \left(\frac{\delta^2 f}{\delta u_i^2} \right)^{-1} \cdot \left(\frac{\delta f}{\delta u_i} \right) \quad (3.45)$$

3.9. Método Misto

Trata-se de uma combinação dos métodos: Gradiente Ótimo (3.6) e Hessiano Aproximado (3.8), que Dommel-Tinney implementaram [1].

Basicamente, utiliza-se o método gradiente com o fator c obtido pelo método Gradiente Ótimo ou, se possível, por algum outro critério que forneça um valor de c satisfatório, com tempo de computação menor, e, sempre que uma das componentes do gradiente muda de sinal do ciclo $(v-1)$ para o ciclo (v) , assume-se que sua respectiva variável de controle está próxima do ótimo e, neste caso, utiliza-se (3.45) com

$$\frac{\delta^2 f}{\delta u_i^2} \approx \frac{\left(\frac{\delta f}{\delta u_i} \right)^{(v-1)} - \left(\frac{\delta f}{\delta u_i} \right)^{(v)}}{u_i^{(v-1)} - u_i^{(v)}} \quad (3.46)$$

desde que $\frac{\delta^2 f}{\delta u_i^2}$ seja positivo, pois em caso contrário, u_i permanece inalterada.

CAPÍTULO IV

TESTES E RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados resultados obtidos em testes realizados com o Sistema Sudeste: 645 barras, 1019 linhas, 57 barras de tensão controlada (PV), 23 transformadores de tap variável e 169 transformadores de tap fixo (carga pesada - ano 1979).

Foi adotada uma versão do método Hessiano Aproximado, na qual foram introduzidas algumas modificações visando-se uma maior eficiência, principalmente no que se refere ao algoritmo de obtenção dos elementos da diagonal principal da matriz Hessiana conforme a formulação apresentada em 3.8. Os diagramas das figs. 4.1 e 4.2 mostram os principais passos da versão adotada, com as seguintes características particulares:

- . função objetivo: perdas de transmissão
- . variáveis de controle: magnitudes das tensões das barras PV e tap's variáveis.
- . restrições nas magnitudes das tensões das barras PQ adicionadas à função objetivo via funções penalidades (vide 3.4.6).
- . $0,9 \leq V \leq 1,1$ pu para todas as barras exceto as correspondentes ao nó fictício e ao nó terminal do enrolamento de baixa tensão dos transformadores de três enrolamentos. Para estas barras os limites são livres.

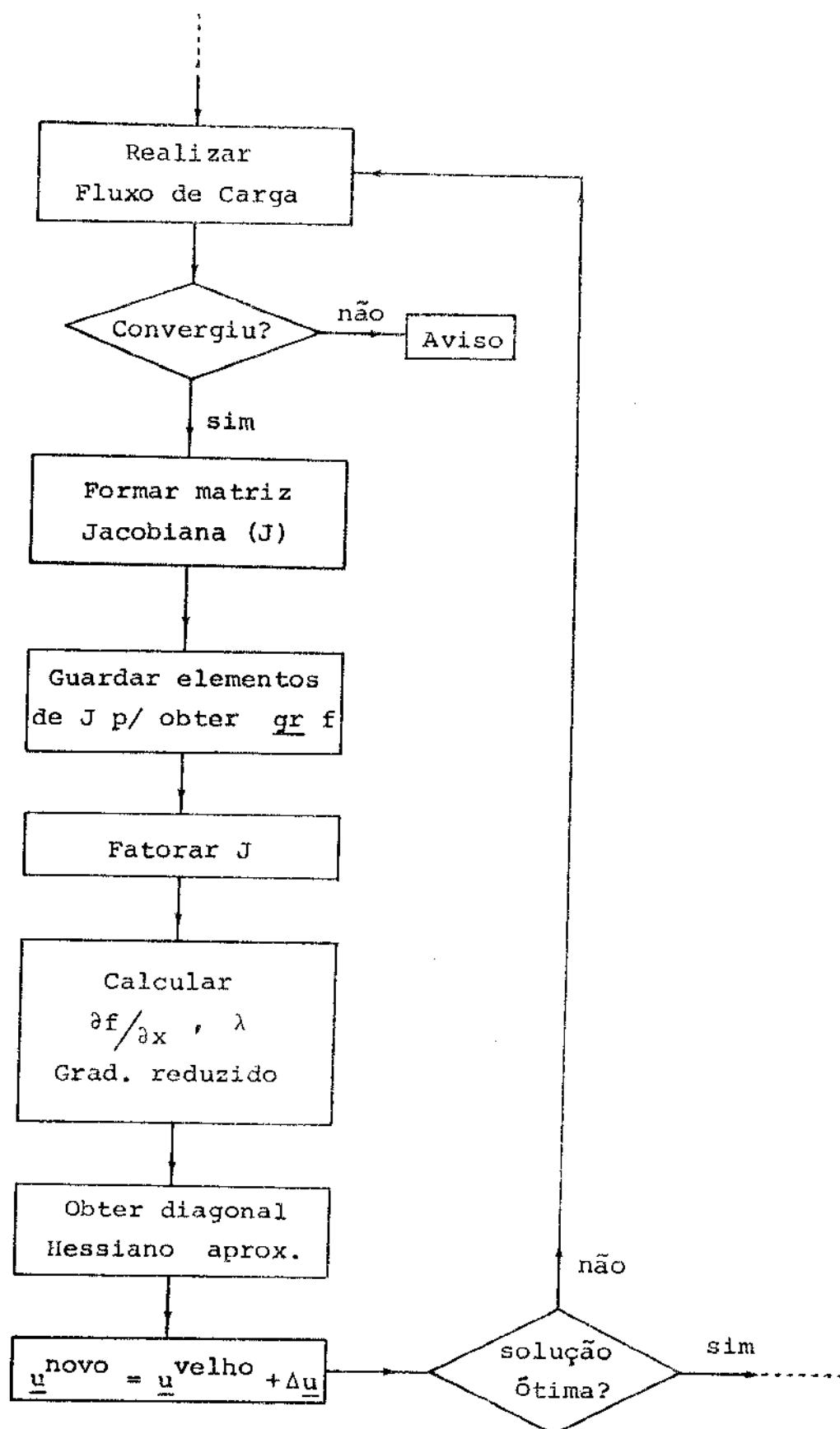


Fig. 4.1. Algoritmo simplificado do método Hessiano Aproximado.

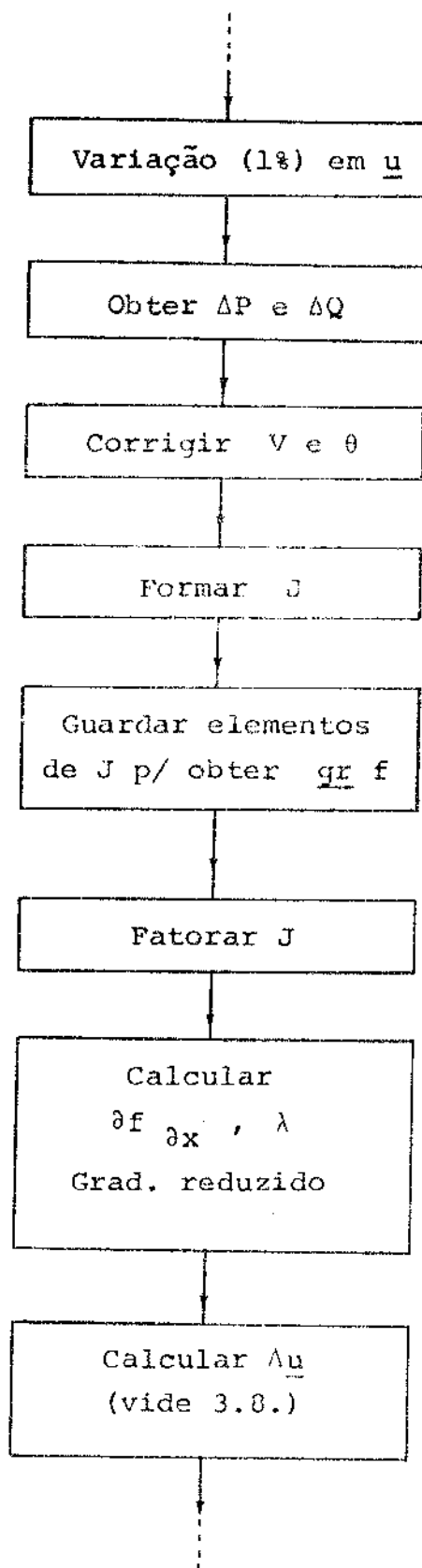


Fig. 4.2. Obtenção de Δu pelo método Hessiano Aproximado.

A tabela 4.1 apresenta a condição inicial do processo de otimização, a partir do qual foi determinado o ótimo local "mais próximo" (tabela 4.2). Esta condição inicial foi obtida da solução do fluxo de carga Newton-Raphson, com convergência fixa da em 0,1 MW e 0,1 MVAR, cuja inicialização para a obtenção da tabela 4.1 foi a seguinte:

- . Magnitudes das tensões das barras PV e slack (folga) expressas na tabela 4.1.
- . Magnitudes das tensões das barras PQ iguais a 1,0 pu.
- . Ângulo de referência (θ_{slack}) e demais ângulos iguais a zero.
- . Transformadores com tap fixo e com tap variável iguais aos valores das colunas tap inicial da tabela 4.4.

Em aplicações do tipo planejamento da expansão ou da operação, o ponto inicial do processo de otimização é normalmente obtido desta forma, ou seja, pela solução de um fluxo de carga convencional. Por outro lado, nas aplicações de controle em tempo real, este ponto inicial pode ser fornecido por um estimador de estado.

BARRA	TIPO	V	ANG.	MW	MVAR	BARRA	TIPO	V	ANG.	MW	MVAR
104	SL	1.030	0.0	1255.6	255.4	744	P1	0.989	-25.7	-2.6	-0.9
100	PV	1.040	12.0	320.0	22.4	745	P0	0.966	-17.4	-2.9	-1.0
101	PV	1.020	4.9	1100.0	66.0	746	P0	0.986	-27.1	-3.8	-1.4
102	PV	0.995	4.3	170.0	61.7	747	P0	0.979	-25.1	-6.2	-2.3
103	PV	1.035	5.9	300.0	48.6	748	P0	0.995	-14.2	-19.3	-6.3
107	PV	1.025	-19.2	500.0	-6.3	749	P1	0.985	-23.8	-6.1	-2.1
108	PQ	1.038	6.2	-0.0	-0.0	750	P1	0.998	-26.5	0.0	0.0
109	PQ	1.023	4.4	0.0	0.0	751	P0	0.963	-16.8	-2.5	-0.8
112	PQ	1.018	-0.5	-0.0	0.0	752	P0	1.007	-23.2	-3.5	-1.2
113	PQ	1.023	-0.8	0.0	0.0	754	P1	0.988	-21.3	-17.6	-6.4
114	PQ	1.013	-6.6	-0.0	0.0	754	P0	0.989	-22.7	-4.0	-1.3
116	PQ	1.034	-2.2	0.0	0.0	755	P0	1.010	-20.0	-3.0	-1.0
117	PQ	1.006	6.0	-0.0	0.0	756	P0	1.017	-15.9	-2.0	-0.7
118	PQ	0.977	4.8	-0.0	-0.0	757	P0	1.012	-21.9	-4.7	-1.5
119	PQ	0.828	4.8	0.0	0.0	758	P0	0.977	-25.3	-2.7	-1.0
120	PQ	0.948	-15.0	-0.0	0.0	759	P0	0.994	-27.5	0.0	-0.0
121	PQ	1.043	-19.2	0.0	0.1	760	P0	0.990	-21.4	-2.2	-0.8
122	PQ	0.916	-20.5	0.0	0.0	761	P0	1.026	-2.8	-15.8	-5.2
123	PQ	0.992	-24.2	0.0	0.0	762	P0	0.982	-20.9	-2.2	-0.8
124	PQ	0.924	-26.7	0.0	0.0	763	P0	1.012	-15.7	-6.7	-2.2
125	PV	1.030	-30.3	-0.0	20.7	764	P0	0.952	-15.0	0.0	0.0
126	PQ	0.922	-29.5	-0.0	0.0	765	PV	1.000	-17.4	-3.7	-16.3
127	PQ	1.011	-31.7	0.0	0.0	766	P0	0.968	-25.0	-3.3	-1.2
130	PV	0.937	-44.7	0.0	4.4	767	P0	0.972	-17.4	-1.3	-0.4
131	PQ	0.946	-44.7	0.0	-0.0	768	P0	0.989	-24.4	-4.2	-1.5
139	PQ	0.994	-48.0	0.0	-0.0	769	P1	0.992	-17.4	-1.1	-0.4
140	PQ	1.000	-21.7	-0.0	0.0	770	P0	1.007	-12.6	-5.5	-1.8
141	PQ	0.991	-36.7	0.0	0.0	771	P0	1.038	-12.9	-5.7	-1.9
142	PQ	0.987	-38.7	-0.0	0.0	772	P1	0.988	-25.0	-11.0	-4.0
143	PQ	0.971	-43.3	-168.6	9.4	773	P0	0.976	-25.1	-10.8	-3.8
144	PQ	0.969	-44.7	-87.8	-2.7	774	P0	0.984	-27.7	-3.5	-1.3
146	PQ	0.972	-45.9	-14.0	-15.0	775	P0	1.010	-22.9	-3.1	-1.0
159	PQ	1.001	-50.7	0.0	0.0	776	PQ	0.966	-16.0	-4.1	-2.7
160	PQ	1.025	-40.7	-86.7	-16.8	777	P0	0.991	-24.3	-6.5	-2.4
161	PQ	1.012	-42.7	-239.7	-38.1	778	P0	0.976	-13.2	-2.6	-0.9
162	PQ	1.018	-45.3	-32.4	-3.0	780	P1	1.018	-18.0	-14.8	-4.9
163	PQ	1.004	-46.0	-43.1	-16.1	781	P0	1.004	-20.5	-8.9	-2.9
164	PQ	1.003	-50.1	-0.0	-0.0	782	P0	1.003	-20.6	-6.5	-2.1
165	PQ	1.015	-44.0	-0.0	0.0	783	P0	0.987	-15.5	-2.6	-0.9
166	PQ	0.959	-41.8	-0.0	0.0	784	P1	0.999	-20.7	-3.4	-1.1
167	PQ	0.813	-41.8	0.0	-0.0	785	P0	0.979	-16.0	-0.0	-0.0
168	PQ	0.852	-15.5	0.0	0.0	786	P1	0.952	-12.4	0.0	0.0
169	PQ	1.006	-15.5	-0.0	0.0	787	P0	0.992	-26.9	-2.9	-1.1
170	PV	1.000	13.8	1415.0	-151.3	788	P1	1.004	-16.1	0.0	0.0
171	PQ	1.018	7.5	-0.0	-0.0	789	P0	0.982	-16.7	0.0	0.0
172	PQ	1.008	-4.4	-0.0	0.0	790	P0	1.025	-11.7	-15.5	-5.1
173	PQ	1.024	-14.3	-0.0	0.0	791	P0	1.011	-16.7	-10.1	-3.4
174	PQ	1.015	-15.7	-0.0	0.0	792	P0	1.009	-14.7	-10.4	-3.4

Tabela 4.1. Condição inicial do processo de otimização

BARRA	TIPO	V	ANG.	MW	MVAR	BARRA	TIPO	V	ANG.	MW	MVAR
175	PQ	1.032	-23.7	-0.0	0.0	793	PQ	1.009	-14.8	-10.4	-3.4
176	PQ	1.017	-30.2	-1092.0	-94.3	794	PQ	0.954	-18.2	0.0	0.0
177	PQ	0.957	-24.2	-0.0	0.0	795	PQ	0.966	-17.5	-6.2	-1.9
178	PQ	0.811	-24.2	0.0	0.0	796	PQ	0.992	-1.5	-11.0	-3.6
179	PQ	1.031	-24.6	-0.0	-0.0	797	PQ	0.968	-16.8	-14.4	-5.6
180	PQ	1.057	5.5	0.0	-0.0	798	PQ	1.034	-2.2	-1.6	-0.5
181	PQ	1.007	3.4	0.0	-0.0	799	PQ	0.951	-15.9	-7.5	-2.5
182	PQ	1.056	4.0	-0.0	0.0	900	PV	1.030	8.5	30.0	-0.6
183	PQ	1.009	1.8	-0.0	0.0	901	PV	1.030	9.4	100.0	0.8
184	PQ	1.009	1.8	0.0	0.0	902	PV	1.030	10.5	50.0	-1.4
185	PQ	1.019	-2.9	0.0	-0.0	903	PV	1.030	10.1	233.0	-8.6
186	PQ	0.995	-1.1	0.0	0.0	904	PQ	1.042	-7.1	-50.9	-23.2
187	PQ	1.030	-5.1	-0.0	-0.0	906	PQ	1.019	-2.9	-0.0	0.0
188	PQ	1.055	-6.1	-125.0	-63.4	907	PQ	1.029	-5.7	-151.0	-49.7
189	PQ	1.027	-5.5	0.0	0.0	908	PQ	1.057	5.2	0.0	0.0
190	PV	1.010	-9.0	-81.5	-12.9	909	PQ	1.039	4.2	0.0	0.0
191	PQ	0.990	-3.9	-0.0	0.0	910	PQ	1.014	-3.3	-0.0	-0.0
196	PQ	0.972	-45.4	5.0	-16.6	911	PQ	0.980	-5.8	-50.4	16.9
200	PV	1.000	-20.0	0.0	-12.2	912	PQ	1.007	-1.4	0.0	0.0
201	PV	1.020	-24.2	0.0	15.5	913	PQ	0.986	-4.7	-4.8	-1.6
202	PV	1.020	-23.7	80.0	46.9	914	PQ	1.011	-9.7	-19.8	-4.9
203	PV	1.020	4.4	350.0	13.1	915	PQ	1.036	0.5	-0.0	-0.0
204	PV	0.976	-21.0	18.0	8.1	916	PQ	1.030	-6.9	-29.8	-6.2
205	PV	1.030	-26.2	90.0	26.4	950	PQ	0.996	-10.5	-31.2	-17.1
206	PV	1.000	-24.7	-32.0	-56.8	953	PQ	1.038	-12.9	-0.0	-0.0
207	PV	1.025	18.2	1300.0	-53.4	956	PQ	1.027	-4.4	-4.6	-2.5
208	PV	1.030	-6.7	285.0	4.2	957	PQ	0.986	-10.8	-19.8	-11.8
209	PV	1.020	7.5	300.0	-5.5	959	PQ	1.019	-17.9	-0.0	-0.0
211	PQ	0.973	-8.0	-75.0	-23.0	960	PQ	1.031	-15.3	0.0	-0.0
212	PQ	1.010	-15.3	-28.0	-11.0	961	PQ	1.022	-6.3	-5.2	-2.7
213	PQ	1.015	0.4	-19.0	-8.0	962	PQ	1.018	-10.1	0.0	0.0
214	PQ	1.035	-23.9	-15.0	-2.0	963	PQ	1.017	-10.2	-5.0	-2.4
215	PQ	0.998	-20.7	0.0	0.0	964	PQ	1.012	-6.7	-4.9	-3.0
216	PQ	1.087	-20.0	0.0	0.0	965	PQ	1.023	-10.3	-0.0	-0.0
217	PQ	1.018	-24.3	-230.0	-110.0	966	PQ	1.012	-12.4	0.0	0.0
218	PQ	0.981	-20.0	0.0	-0.0	967	PQ	1.021	-10.7	0.0	0.0
219	PQ	1.023	-25.7	-19.9	-9.0	968	PQ	1.009	-10.8	-6.8	-3.5
220	PQ	1.011	-23.7	-72.0	-33.0	970	PQ	1.019	-12.4	-5.0	-2.4
221	PQ	1.016	-24.6	-113.0	-30.0	972	PQ	1.002	-11.3	-69.2	-37.4
222	PQ	1.025	-27.6	-10.0	-5.9	973	PQ	1.033	-10.3	-1.4	-0.7
223	PQ	1.012	-26.0	-8.0	-3.9	974	PQ	1.009	-13.2	-0.0	-0.0
224	PQ	1.003	-24.0	-30.0	-9.0	975	PQ	1.006	-15.4	0.0	0.0
225	PQ	1.013	-23.4	-24.0	-8.0	978	PQ	0.968	-12.1	-16.2	-9.6
226	PQ	1.003	-25.0	-10.6	-4.6	979	PQ	1.015	-8.3	-0.0	-0.0
227	PQ	0.993	-27.5	-34.0	-11.0	980	PQ	0.986	-12.9	0.0	0.0
228	PQ	1.001	-24.2	-13.0	-8.0	981	PQ	0.983	-13.1	-30.0	-13.8
229	PQ	1.003	-28.3	-63.6	-29.0	982	PQ	1.014	-13.3	-0.0	-0.1
230	PQ	1.010	-25.9	-1.5	-0.6	983	PV	1.020	-19.6	20.0	5.8

Tabela 4.1. continuação

BARRA	TIPO	V	ANG.	MW	MVAR	BARRA	TIPO	V	ANG.	MW	MVAR
231	PQ	0.955	-23.4	-52.0	-22.0	984	PV	1.030	-18.9	40.0	4.0
232	PQ	1.007	-25.8	-35.0	-8.0	985	PV	1.030	-19.4	70.0	30.0
233	PQ	1.008	-24.2	0.0	0.0	989	PQ	0.978	-24.4	-5.4	-2.8
234	PQ	0.988	-34.7	-79.0	-30.0	990	PQ	0.994	-26.7	-0.0	0.0
236	PQ	0.991	-37.3	-56.0	-18.4	993	PQ	0.973	-23.9	-22.7	-10.4
237	PQ	0.992	-34.1	-0.0	0.0	994	PQ	0.974	-23.9	0.0	0.0
238	PQ	0.982	-34.7	-245.0	-120.0	995	PQ	0.974	-23.9	-2.2	-1.0
240	PQ	1.003	-29.1	-79.4	-30.0	996	PQ	1.042	-29.0	-0.0	0.0
241	PQ	0.971	-24.4	-27.9	-14.6	997	PQ	1.042	-29.0	-3.0	-1.5
242	PQ	1.032	-27.7	-82.0	-20.0	998	PQ	1.011	-22.3	0.0	0.0
243	PQ	1.031	-2.0	0.0	0.0	999	PQ	1.006	-28.4	-13.6	-8.2
244	PQ	1.040	-3.4	0.0	0.0	1180	PQ	0.994	-21.2	-0.0	0.0
245	PQ	1.021	-1.2	0.0	0.0	1181	PQ	0.999	-28.1	-25.0	-14.8
246	PQ	1.031	-2.0	-0.0	0.0	1182	PQ	0.998	-21.2	-0.0	-0.0
247	PQ	0.987	-28.2	-64.0	-47.0	1183	PQ	1.018	-21.6	-14.5	-4.2
248	PQ	0.998	-27.4	-53.0	-26.0	1184	PQ	1.004	-22.6	-7.9	-4.9
249	PQ	1.006	-25.7	-24.0	-9.0	1185	PQ	0.987	-24.5	-15.6	-6.2
250	PQ	0.997	-19.5	-38.0	-14.0	1186	PQ	0.985	-24.5	0.0	0.0
252	PQ	0.970	-14.8	0.0	-0.0	1187	PQ	0.985	-24.5	-4.1	-3.1
253	PQ	1.025	-14.8	0.0	0.0	1188	PQ	0.976	-24.1	0.0	0.0
254	PQ	1.022	-21.9	-100.0	-32.0	1189	PQ	0.976	-24.1	-2.2	-1.1
255	PQ	0.993	-17.9	-0.0	-0.0	1190	PQ	0.989	-22.7	0.0	0.0
256	PQ	1.025	-14.8	-0.0	0.0	1191	PQ	1.010	-20.0	0.0	0.0
257	PQ	1.013	-25.2	-44.0	-15.0	1193	PQ	1.013	-22.3	-0.0	-0.0
258	PQ	0.979	-5.9	-38.0	-15.0	1194	PQ	1.026	-28.8	-26.0	-9.4
259	PQ	1.029	-24.6	-15.0	-7.2	1195	PQ	0.976	-24.2	0.0	0.0
260	PQ	1.002	-24.2	-18.0	-7.0	1196	PQ	0.976	-24.3	-5.0	-3.8
261	PQ	0.999	-23.2	-0.0	0.0	1197	PQ	1.010	-22.8	-0.0	-0.0
262	PQ	1.001	-26.9	0.0	-0.0	1203	PQ	0.975	-23.8	-14.5	-4.8
263	PQ	1.035	-12.7	0.0	0.0	1204	PQ	0.977	-24.3	-42.4	-22.9
264	PQ	1.017	-10.1	0.0	0.0	1205	PQ	0.979	-24.3	0.0	0.0
265	PQ	0.991	-18.0	-27.0	-13.0	1206	PQ	0.978	-24.4	-12.0	-6.5
266	PQ	1.013	-23.8	-16.1	-9.3	1208	PQ	0.977	-24.3	-13.0	-7.0
267	PQ	1.010	-25.5	-6.0	-1.5	1210	PQ	1.021	-28.8	-7.4	-2.9
268	PQ	1.028	-4.7	-1.5	-0.7	1212	PQ	1.011	-22.5	-16.5	-4.3
269	PQ	0.974	-25.9	-160.0	-93.0	1213	PQ	0.990	-24.5	-25.0	-15.5
270	PQ	1.003	-26.5	-52.0	-24.0	1214	PQ	0.993	-24.4	-0.0	0.0
271	PQ	1.036	-30.3	-1.8	-0.6	1215	PQ	0.992	-24.7	-16.0	-8.6
272	PQ	1.022	-27.2	-14.0	-1.0	1216	PQ	1.043	-19.2	-0.0	-0.1
273	PQ	1.001	-24.3	-35.0	-7.0	1217	PQ	0.985	-23.1	-13.4	-7.6
274	PQ	1.037	11.6	-0.0	0.0	1218	PQ	0.991	-24.3	0.0	-0.0
275	PQ	1.000	-24.4	-15.5	-8.4	1219	PQ	0.979	-23.5	-19.0	-11.3
276	PQ	1.111	-20.6	0.0	0.0	1220	PQ	0.990	-23.0	0.0	0.0
277	PQ	1.104	-20.6	0.0	0.0	1221	PQ	0.990	-23.0	-3.0	-1.8
278	PQ	1.014	-25.7	-58.0	-30.0	1223	PQ	0.976	-23.7	-38.2	-22.6
279	PQ	1.032	-23.7	-0.0	0.0	1224	PQ	0.978	-23.3	0.0	0.0
280	PQ	0.984	-20.6	-0.0	0.0	1225	PQ	0.977	-23.4	-10.5	-6.2
281	PQ	1.018	-13.7	-50.0	-22.0	1226	PQ	0.989	-24.5	0.0	-0.0

Tabela 4.1. continuação

BAFRA	TIPO	V	ANG.	MW	MVAR	BAFRA	TIPO	V	ANG.	MW	MVAR
282	PQ	1.006	-10.9	0.0	-0.0	1227	PQ	0.989	-24.6	-11.2	-4.4
283	PQ	1.011	-12.1	-0.0	0.0	1229	PQ	0.984	-23.2	0.0	-0.0
284	PQ	1.015	-5.2	-45.0	-12.0	1230	PQ	0.984	-23.2	-6.0	-3.7
285	PQ	1.011	-2.9	-39.0	-13.0	1231	PQ	0.979	-24.3	0.0	-0.0
286	PQ	1.011	-40.5	-39.0	-12.0	1233	PQ	0.997	-21.6	-0.0	0.0
287	PQ	0.994	-39.2	-0.0	0.0	1234	PQ	0.992	-21.2	0.0	0.0
288	PQ	1.024	3.1	0.0	-0.0	1235	PQ	1.017	-29.0	-18.9	-11.7
289	PQ	0.997	-17.6	-16.0	-7.4	1236	PQ	0.993	-23.9	-34.4	-14.7
290	PQ	1.043	-19.2	-235.0	-75.0	1239	PQ	0.983	-23.2	-4.3	-2.7
501	PQ	1.027	-31.4	-0.0	-0.0	1242	PV	1.000	-23.3	20.0	-2.3
502	PQ	1.027	-31.4	0.0	0.0	1243	PV	1.010	-21.3	70.0	-5.6
503	PQ	1.024	-31.5	0.0	-0.0	1245	PQ	1.035	-29.9	-0.0	0.0
504	PQ	1.024	-31.5	0.0	-0.0	1246	PQ	1.034	-32.8	0.0	0.0
505	PQ	0.992	-37.2	-0.0	0.0	1247	PQ	1.015	-29.5	0.0	-0.0
506	PQ	0.932	-41.9	-32.0	-4.0	1248	PQ	1.014	-27.9	-15.0	-3.0
507	PQ	0.937	-33.1	0.0	0.0	1249	PQ	1.031	-30.2	-22.0	-9.4
508	PQ	1.012	-41.1	-507.0	0.0	1250	PQ	1.028	-29.9	-29.0	-10.2
509	PQ	1.004	-37.3	-90.0	-4.0	1252	PQ	1.021	-29.8	-17.0	-10.5
510	PQ	0.931	-33.5	-0.0	-0.0	1253	PQ	1.013	-29.7	-7.7	-4.2
511	PQ	0.931	-33.7	-0.0	0.0	1255	PQ	1.020	-33.2	-2.8	-1.4
512	PQ	0.929	-33.1	0.0	-0.0	1256	PQ	1.022	-33.6	0.0	0.0
513	PQ	1.023	-33.3	-0.0	0.0	1257	PQ	1.016	-33.8	-17.0	-7.2
515	PQ	1.000	-35.5	-212.0	-88.0	1258	PQ	1.007	-26.1	0.0	-0.0
516	PQ	1.031	-32.2	-0.0	0.0	1259	PQ	0.996	-27.6	-6.3	-4.2
517	PQ	0.976	-35.1	-120.0	-6.0	1260	PQ	1.010	-28.6	-0.0	0.0
518	PQ	0.995	-34.7	-114.0	-5.0	1262	PQ	1.018	-25.2	-3.6	-2.1
519	PQ	1.027	-31.7	3.0	-0.0	1263	PQ	0.995	-27.8	-5.7	-2.9
520	PQ	1.027	-31.7	0.0	-0.0	1264	PQ	1.022	-33.7	-0.0	-0.0
523	PQ	1.026	-30.7	0.0	-0.0	1266	PQ	1.014	-27.3	0.0	0.0
524	PQ	1.003	-37.3	-370.0	-17.0	1267	PQ	1.009	-27.5	-0.2	-3.2
527	PQ	1.024	-34.3	0.0	-0.0	1268	PQ	0.995	-27.9	-14.1	-6.8
528	PV	1.016	-33.1	95.0	189.8	1269	PQ	1.013	-25.6	0.0	0.0
529	PQ	1.010	-41.5	-141.0	-58.0	1272	PQ	0.996	-28.7	-13.0	-8.0
530	PV	0.977	-39.3	65.0	28.5	1273	PQ	1.011	-27.9	-0.0	-0.0
531	PQ	1.010	-40.3	-207.0	-17.0	1274	PQ	1.011	-27.9	-7.3	-3.5
532	PV	0.942	-38.6	70.0	-47.3	1275	PQ	1.004	-28.2	-3.5	-2.2
533	PQ	0.938	-32.5	0.0	-0.0	1276	PQ	1.006	-28.4	-1.1	-0.4
534	PQ	1.026	-33.9	-0.0	0.0	1277	PQ	1.024	-25.6	-0.9	-0.8
536	PQ	0.922	-33.4	-0.0	0.0	1278	PQ	0.975	-32.0	-23.2	-11.9
538	PQ	0.987	-39.9	-518.0	-9.0	1279	PQ	0.975	-32.0	-5.7	-2.9
539	PQ	0.924	-29.7	0.0	-0.0	1281	PQ	1.005	-28.4	-17.8	-9.1
540	PQ	1.010	-32.1	0.0	0.0	1283	PQ	1.014	-27.8	-1.1	-0.5
541	PQ	1.019	-32.1	0.0	-0.0	1285	PQ	1.020	-30.7	-18.6	-10.0
542	PQ	1.019	-32.1	-24.0	-13.0	1286	PQ	1.006	-28.0	-25.3	-21.7
543	PQ	0.996	-36.4	-155.0	-11.0	1288	PQ	1.010	-27.9	-16.6	-8.4
544	PQ	0.923	-28.7	0.0	-0.0	1290	PQ	1.027	-30.3	-9.4	-3.1
545	PQ	0.984	-35.9	-190.0	0.0	1292	PQ	1.018	-30.8	-0.0	-0.0
546	PQ	1.029	-30.8	-0.0	-0.0	1293	PQ	1.015	-30.8	-0.0	0.0

Tabela 4.1. continuação

BARRA	TIPO	V	ANG.	MW	MVAR	BARRA	TIPO	V	ANG.	MW	MVAR
547	PQ	1.010	-36.9	-388.0	-0.0	1295	PQ	1.000	-30.6	-18.3	-7.6
549	PQ	1.025	-28.9	-0.0	-0.0	1297	PQ	1.012	-27.7	-13.0	-6.7
550	PQ	1.008	-33.6	-200.0	-2.0	1299	PQ	1.011	-27.9	-4.9	-2.4
551	PQ	1.025	-34.0	0.0	0.0	1300	PQ	1.003	-50.1	0.0	0.0
552	PV	1.000	-34.0	0.0	-0.8	1301	PQ	1.004	-52.9	-17.7	-8.7
553	PQ	1.015	-38.0	-183.0	-17.0	1302	PQ	0.997	-51.3	-36.0	-25.5
554	PV	1.000	-38.0	0.0	22.0	1303	PQ	0.998	-51.2	-2.5	-1.0
555	PQ	1.023	-32.1	0.0	-0.0	1304	PQ	1.009	-54.3	-1.5	-0.9
556	PQ	0.998	-37.9	-189.0	-11.0	1305	PQ	0.998	-51.4	0.0	-0.0
565	PQ	0.921	-33.8	-0.0	0.0	1306	PQ	0.999	-51.0	0.0	0.0
567	PQ	0.950	-40.9	-392.0	-3.0	1307	PQ	1.042	-53.2	-12.1	-7.0
568	PQ	0.997	-35.8	-0.0	0.0	1308	PV	1.050	-53.3	0.0	6.5
569	PQ	0.939	-41.4	-230.0	-46.0	1309	PQ	0.991	-51.4	-85.0	-50.0
571	PQ	0.928	-35.1	-0.0	0.0	1310	PQ	0.992	-51.4	-78.0	-48.0
572	PQ	0.979	-45.9	-567.0	-13.0	1311	PQ	1.000	-50.7	-0.0	-0.1
574	PQ	1.001	-33.4	-73.0	-12.0	1312	PQ	1.020	-49.3	0.0	-0.0
575	PQ	1.008	-31.1	-123.0	-23.0	1313	PQ	1.030	-44.9	30.3	5.2
576	PQ	0.938	-32.9	-0.0	0.0	1314	PQ	0.995	-48.1	-0.0	0.0
578	PQ	0.923	-28.3	-0.0	0.0	1315	PQ	1.034	-44.3	0.0	0.0
579	PQ	0.923	-28.8	-0.0	0.0	1316	PV	1.050	-38.9	118.6	25.3
580	PQ	1.030	-30.3	0.0	0.0	1319	PQ	1.007	-48.0	-26.8	-12.0
581	PQ	1.011	-31.7	-0.0	0.1	1320	PQ	0.993	-49.3	-8.7	-3.4
582	PQ	0.939	-30.5	-0.0	0.0	1321	PQ	1.009	-48.7	-10.5	-6.0
584	PQ	0.928	-28.4	-0.0	0.0	1322	PQ	0.979	-49.3	-4.2	-2.5
585	PQ	0.922	-29.5	0.0	0.0	1323	PQ	0.980	-48.5	-3.6	-1.8
600	PV	1.030	13.6	690.0	-17.9	1324	PQ	0.999	-47.7	0.0	-0.0
601	PV	1.025	0.5	500.0	82.5	1325	PV	1.030	-44.9	15.0	2.0
602	PV	1.039	10.8	2645.0	-118.0	1326	PQ	1.006	-54.5	-15.7	-9.2
603	PV	1.025	10.6	1130.9	-26.2	1327	PQ	1.017	-54.1	-13.5	-7.2
604	PV	1.015	4.9	190.0	-18.3	1328	PQ	1.005	-54.6	-12.5	-6.0
612	PQ	1.014	-12.2	-0.0	0.0	1329	PQ	1.004	-54.6	-4.9	-3.0
613	PQ	0.973	-15.7	-0.0	-0.0	1330	PQ	1.004	-54.5	-10.6	-6.0
614	PQ	1.000	-10.0	0.0	0.0	1331	PQ	1.019	-54.5	0.0	0.0
616	PQ	1.047	9.2	-0.0	0.0	1332	PQ	1.029	-53.3	0.0	-0.0
617	PQ	1.036	8.7	-0.0	0.0	1333	PQ	1.039	-53.3	0.0	0.0
619	PQ	1.017	-11.8	-0.0	0.0	1334	PQ	1.038	-53.3	0.0	-0.0
620	PQ	1.028	-15.3	0.0	0.0	1335	PQ	0.995	-51.4	-103.0	-26.0
621	PQ	1.026	-26.2	0.0	0.0	1336	PQ	1.021	-42.7	0.0	0.0
622	PQ	1.029	-28.2	-0.0	0.0	1337	PQ	1.019	-54.5	0.0	-0.0
623	PQ	1.047	-28.1	-1.9	-1.2	1338	PQ	1.019	-47.6	-0.0	-0.0
625	PQ	1.013	-5.7	-0.0	0.0	1339	PQ	1.014	-49.1	-2.5	-1.0
626	PQ	1.034	-9.2	-0.6	-0.1	1340	PQ	1.024	-46.8	-5.5	-2.5
627	PQ	1.021	-28.0	-0.0	0.0	1342	PQ	0.998	-49.4	-2.2	-1.0
628	PQ	0.941	-30.0	-0.0	0.0	1343	PQ	1.007	-49.5	-1.0	-0.3
629	PQ	1.040	-29.4	-0.0	0.0	1344	PQ	0.981	-50.2	-4.3	-2.2
630	PV	1.000	-28.0	0.0	-52.3	1400	PQ	0.941	-29.6	-2.4	-0.9
631	PQ	1.027	-30.4	-0.0	0.0	1401	PQ	0.967	-12.5	-15.5	-5.1
633	PQ	1.041	7.0	-0.0	0.0	1402	PQ	1.008	-14.4	0.0	0.0

Tabela 4.1. continuação

BARRA	TIPO	V	ANG.	MW	MVAR	BARRA	TIPO	V	ANG.	MW	MVAR
634	PQ	1.031	5.6	-0.0	0.0	1403	PQ	0.993	-14.5	-6.7	-2.2
635	PQ	1.054	-0.3	-92.3	33.9	1404	PQ	0.975	-9.6	-3.2	-1.1
643	PQ	1.019	-20.0	-0.0	0.0	1405	PQ	0.982	-25.0	-19.7	-7.0
644	PQ	0.997	-23.7	-0.0	0.0	1406	PQ	0.989	-24.4	-11.9	-4.3
649	PQ	1.023	-26.9	-0.0	0.0	1407	PQ	0.988	-18.3	-2.1	-0.7
650	PQ	0.928	-28.3	-0.0	0.0	1408	PQ	1.038	6.2	9.0	0.1
651	PQ	1.052	-29.1	-0.0	0.0	1409	PQ	1.008	-13.1	-5.1	-8.5
655	PQ	1.030	-26.1	-0.0	0.0	1410	PQ	0.988	-24.3	-16.0	-5.8
656	PQ	1.008	-31.1	0.0	0.0	1411	PQ	0.933	-14.2	-1.8	-0.6
657	PQ	1.001	-33.4	0.0	-0.0	1412	PQ	1.001	-8.3	-31.8	-10.5
662	PV	1.040	-11.7	90.0	8.6	1413	PQ	0.995	-3.6	0.0	0.0
663	PV	0.950	-8.9	70.0	4.9	1414	PQ	1.001	-26.9	-0.0	0.0
664	PV	1.040	-11.0	300.0	30.3	1415	PQ	0.988	-18.0	-2.6	-0.9
666	PQ	1.035	-17.8	-0.0	0.0	1416	PQ	0.987	-24.4	-8.3	-3.0
667	PQ	1.039	-20.1	0.0	-0.0	1417	PQ	0.990	-24.3	-8.6	-3.1
668	PQ	1.024	-14.5	-267.0	-45.0	1418	PQ	0.986	-24.5	-8.3	-3.0
670	PQ	1.018	-21.6	-0.0	0.0	1419	PQ	0.988	-24.3	-0.0	0.0
671	PQ	1.017	-21.5	-29.1	-28.4	1420	PQ	0.974	-25.6	-5.8	-2.1
672	PQ	0.998	-24.7	-0.0	-0.0	1421	PQ	0.983	-13.9	-10.8	-3.6
673	PQ	1.018	-27.3	-2.8	-1.4	1422	PQ	0.989	-24.4	-3.1	-1.1
674	PQ	1.022	-26.6	-0.0	0.0	1423	PQ	0.949	-18.9	-7.1	-2.3
675	PQ	1.015	-27.7	-1.0	-0.6	1424	PQ	0.993	-15.8	-3.1	-1.0
676	PQ	1.032	-15.0	0.0	-0.0	1425	PQ	1.033	-10.3	-0.0	0.0
677	PQ	1.031	-15.0	-0.0	-0.0	1426	PQ	0.970	-25.8	-14.8	-5.4
678	PQ	1.036	-14.1	-57.3	-4.9	1427	PQ	0.964	-12.3	-11.5	-3.8
679	PQ	1.026	-28.9	0.0	0.0	1428	PQ	0.980	-24.3	-7.3	-2.7
681	PQ	1.035	-15.6	-133.0	-15.0	1429	PQ	0.989	-21.4	-4.8	-1.7
682	PQ	1.043	-18.2	-20.7	-6.9	1430	PQ	1.008	-3.5	-15.8	-5.2
685	PV	1.030	-16.9	60.0	19.0	1431	PQ	0.990	-24.4	-8.0	-2.9
686	PV	1.040	-9.2	80.0	4.0	1432	PQ	0.965	-12.6	-20.0	-6.6
683	PV	1.030	-13.1	60.0	0.1	1433	PQ	0.957	-14.7	-22.1	-7.3
689	PV	1.040	-8.1	120.0	25.1	1434	PQ	0.957	-14.7	-0.0	-0.0
692	PQ	1.036	-3.1	-17.0	-10.1	1435	PQ	0.962	-14.7	-2.8	-0.9
693	PQ	1.015	-9.9	0.0	0.0	1436	PQ	0.978	-27.4	-2.2	-0.8
691	PQ	0.981	-11.2	-11.8	-5.7	1437	PQ	0.997	-27.0	0.0	0.0
695	PQ	1.018	-19.1	-0.0	0.0	1438	PQ	0.990	-27.2	-0.7	-0.2
697	PQ	1.015	-13.4	-12.6	-7.8	1439	PQ	0.974	-25.6	-0.6	-2.4
699	PQ	0.983	-11.8	-17.7	-11.0	1440	PQ	0.962	-7.8	-3.1	-1.0
700	PQ	1.016	-16.3	-6.1	-2.0	1441	PV	1.000	-21.7	-7.0	57.9
701	PQ	0.983	-21.9	-18.2	-6.6	1442	PQ	1.008	-23.1	-3.7	-1.2
702	PQ	0.993	-26.8	0.0	-0.0	1443	PQ	0.997	-23.8	0.0	-0.0
703	PV	1.010	-23.6	30.0	4.3	1444	PQ	0.995	-23.9	-10.4	-3.8
704	PQ	0.993	-26.8	-14.9	-5.4	1445	PQ	0.985	-27.1	-8.0	-2.9
705	PQ	0.989	-29.0	-20.3	-7.4	1446	PQ	0.970	-16.9	-0.6	-0.2
706	PQ	1.020	-12.0	0.0	0.0	1447	PQ	0.996	-14.5	-6.4	-2.1
707	PQ	1.013	-10.0	-17.2	-5.6	1448	PQ	0.950	-14.5	-15.5	-5.1
708	PQ	0.967	-15.5	-11.7	-3.9	1449	PQ	0.989	-14.2	-0.0	-0.0
709	PV	0.960	-15.6	-13.0	-123.8	1450	PQ	1.010	-22.0	-6.7	-2.2

Tabela 4.1. continuação

BARRA	TIPO	V	ANG.	MW	MVAR	BARRA	TIPO	V	ANG.	MW	MVAR
710	PQ	0.972	-15.7	0.0	-0.0	1451	PQ	0.954	-13.1	-2.0	-0.7
711	PQ	1.024	-13.8	-2.9	-0.9	1452	PQ	1.003	-13.6	0.0	0.0
712	PV	1.000	-9.6	30.0	11.7	1453	PQ	0.997	-14.1	-16.2	-5.3
713	PQ	0.994	-13.8	-7.0	-2.3	1454	PQ	0.985	-16.3	-10.4	-3.4
714	PQ	0.992	-1.4	-0.0	-0.0	1455	PQ	0.996	-15.9	-0.0	-0.0
715	PQ	1.017	-4.9	-14.1	-4.6	1456	PQ	0.993	-27.3	2.7	-2.0
716	PQ	1.018	-16.0	-15.5	-5.1	1457	PQ	0.932	-14.4	-6.3	-2.1
717	PQ	1.024	-15.5	-0.0	-0.0	1458	PQ	0.981	-27.1	-2.0	-0.7
718	PQ	1.022	-15.6	0.0	0.0	1459	PQ	0.975	-25.5	-14.7	-5.3
719	PQ	1.016	-18.2	-20.6	-6.8	1460	PQ	0.969	-16.5	-6.6	-2.2
720	PQ	1.018	-19.1	0.0	0.0	1461	PQ	0.992	-24.2	7.7	-0.0
721	PV	1.000	-21.5	-18.5	-7.5	1462	PQ	0.998	-27.3	-0.0	0.0
722	PQ	0.962	-7.8	-15.0	-4.9	1463	PQ	0.991	-24.3	-13.8	-5.0
723	PQ	1.006	-9.7	0.0	0.0	1464	PQ	0.989	-24.4	-1.1	-1.5
724	PQ	0.993	-27.2	-17.2	-6.2	1465	PQ	1.019	-16.0	-17.0	-5.6
725	PQ	0.990	-19.2	-0.5	-0.2	1466	PQ	0.989	-24.4	-5.1	-1.7
726	PQ	0.984	-24.8	-9.9	-3.6	1467	PQ	0.994	-27.7	0.0	-0.0
727	PQ	0.997	-13.5	-7.4	-2.4	1468	PQ	0.972	-28.6	-12.4	-4.5
728	PQ	0.967	-26.1	-25.4	-9.2	1469	PQ	0.967	-26.1	-31.1	-11.3
729	PQ	1.001	-20.7	-0.7	-0.2	1470	PQ	0.995	-28.4	-0.0	0.0
730	PQ	1.013	-21.8	-14.5	-4.8	1471	PV	1.000	-9.3	7.8	-0.8
731	PQ	0.997	-14.4	-4.2	-1.4	1472	PQ	0.966	-15.7	-11.7	-3.7
732	PQ	1.000	-13.4	-3.6	-1.2	1473	PQ	0.973	-16.6	-0.2	-0.1
733	PQ	0.979	-22.6	-2.3	-0.8	1474	PQ	0.981	-23.5	-0.6	-0.2
734	PQ	0.956	-11.5	-0.9	-0.3	1475	PQ	0.976	-25.4	-13.5	-4.9
735	PQ	0.968	-17.7	-0.6	-0.2	1476	PQ	0.990	-28.8	-10.4	-3.8
736	PQ	0.981	-25.0	-15.5	-5.6	1477	PQ	1.015	-8.3	0.0	0.0
737	PQ	0.987	-28.9	-25.4	-9.2	1478	PQ	0.965	-13.9	-20.0	-6.6
738	PQ	0.989	-26.9	-14.2	-5.2	1479	PQ	0.960	-18.7	-1.2	-0.4
739	PQ	0.912	-30.4	-7.5	-2.7	1480	PQ	0.973	-25.6	0.0	0.0
740	PQ	0.990	-24.4	0.0	-0.0	1481	PQ	0.971	-25.8	-9.6	-3.5
741	PQ	0.999	-26.6	0.0	0.0	1482	PQ	0.993	-11.6	-3.7	-1.2
742	PQ	0.988	-24.3	-6.7	-2.4	1483	PQ	1.014	-13.3	-3.1	-0.9
743	PQ	0.968	-26.0	-12.4	-4.5	1484	PQ	0.968	-24.3	-3.1	-1.0
744	PQ	0.989	-25.7	-2.6	-0.9	1485	PQ	0.989	-14.2	-2.1	-0.7

Tabela 4.1. continuação

Considerou-se como solução ótima (ótimo local), a que satisfizesse os seguintes critérios (em prioridade decrescente):

- . Tolerância de $\pm 0,01$ pu para as barras PQ com limites de tensão violados.
- . Valor absoluto da maior variação das magnitudes das tensões das barras PV menor ou igual a $0,01$ pu.
- . Valor absoluto da maior variação dos tap's variáveis menor ou igual a $0,01$ pu.

A tabela 4.2 mostra os resultados obtidos com o algoritmo das figs. 4.1 e 4.2, com a execução de 5 passos de otimização, 15 fatorações da matriz Jacobiana, com um custo computacional em torno de 2 minutos de C.P.U.

A tabela 4.3 contém os valores inicial e final das magnitudes das tensões das barras PV e slack, e, a tabela 4.4 apresenta os tap's inicial e final dos transformadores com tap variável. Ambas foram extraídas das tabelas 4.1 e 4.2.

BARRA	TIPO	V	ANG.	MW	MVAR	BARRA	TIPO	V	ANG.	MW	MVAR
104	SL	1.049	0.0	1205.9	155.4	744	PQ	1.030	-23.3	-2.6	-0.9
100	PV	1.045	11.8	320.0	-19.0	745	PQ	0.984	-15.7	-2.9	-1.0
101	PV	1.042	5.0	1100.0	15.1	746	PQ	1.032	-24.2	-3.8	-1.4
102	PV	0.994	4.7	170.0	50.3	747	PQ	1.035	-22.6	-6.2	-2.3
103	PV	1.038	6.1	300.0	7.0	748	PQ	1.010	-12.5	-19.3	-6.3
107	PV	1.073	-17.2	500.0	-92.0	749	PQ	1.039	-21.5	-6.1	-2.1
108	PQ	1.056	6.1	0.0	0.0	750	PQ	1.045	-21.1	0.0	0.0
109	PQ	1.054	4.3	0.0	-0.0	751	PQ	0.998	-15.5	-2.5	-0.8
112	PQ	1.041	-0.2	0.0	0.0	752	PQ	1.010	-20.2	-3.5	-1.2
113	PQ	1.042	-0.4	-0.0	-0.0	753	PQ	1.040	-21.9	-17.6	-6.4
114	PQ	1.040	-6.1	0.0	-0.0	754	PQ	1.000	-19.7	-5.0	-1.3
116	PQ	1.041	-1.9	-0.0	0.0	755	PQ	1.049	-17.9	-3.0	-1.0
117	PQ	1.059	5.4	0.0	0.0	756	PQ	1.049	-14.3	-2.0	-0.7
118	PQ	1.010	4.5	0.0	0.0	757	PQ	1.061	-19.8	-4.7	-1.5
119	PQ	0.856	4.5	0.0	0.0	758	PQ	1.031	-22.8	-2.7	-1.0
120	PQ	0.991	-13.6	-0.0	0.0	759	PQ	1.044	-24.7	-0.0	0.0
121	PQ	1.092	-17.4	-0.0	-0.0	760	PQ	1.043	-21.9	-2.2	-0.8
122	PQ	0.966	-18.4	0.0	-0.0	761	PQ	1.034	-2.3	-15.8	-5.2
123	PQ	1.048	-21.8	-0.0	0.0	762	PQ	0.997	-18.7	-2.2	-0.8
124	PQ	0.963	-23.9	0.0	-0.0	763	PQ	1.039	-14.0	-6.7	-2.2
125	PV	1.061	-27.2	-0.0	-219.0	764	PQ	0.990	-13.3	0.0	-0.0
126	PQ	0.970	-26.5	-0.0	0.0	765	PV	1.000	-15.3	-3.7	-42.7
127	PQ	1.066	-28.5	0.0	-0.0	766	PQ	1.024	-23.4	-3.3	-1.2
130	PV	0.943	-40.1	0.0	-18.9	767	PQ	0.990	-15.5	-1.3	-0.4
131	PQ	1.003	-40.1	0.0	-0.0	768	PQ	1.043	-22.0	-4.2	-1.5
139	PQ	1.047	-43.4	0.0	0.0	769	PQ	1.015	-15.6	-1.1	-0.4
140	PQ	1.054	-19.9	-0.0	0.0	770	PQ	1.026	-11.1	-5.5	-1.8
141	PQ	1.057	-33.1	-0.0	-0.0	771	PQ	1.053	-11.0	-5.7	-1.9
142	PQ	1.052	-34.8	0.0	0.0	772	PQ	1.035	-22.5	-11.0	-4.0
143	PQ	1.033	-38.9	-468.6	9.4	773	PQ	1.033	-22.9	-10.8	-3.8
144	PQ	1.028	-40.1	-87.8	-2.7	774	PQ	1.042	-25.0	-3.5	-1.3
146	PQ	1.040	-41.2	-14.0	-15.0	775	PQ	1.022	-19.8	-3.1	-1.0
159	PQ	1.049	-46.0	-0.0	0.0	776	PQ	1.001	-15.3	-8.1	-2.7
160	PQ	1.091	-36.6	-86.7	-18.8	777	PQ	1.044	-21.9	-6.5	-2.4
161	PQ	1.079	-38.4	-239.7	-38.1	778	PQ	0.995	-12.0	-2.6	-0.9
162	PQ	1.083	-40.9	-32.4	-3.0	780	PQ	1.055	-16.1	-14.8	-4.9
163	PQ	1.065	-41.5	-43.2	-16.1	781	PQ	1.042	-18.4	-8.9	-2.9
164	PQ	1.059	-45.4	-0.0	0.0	782	PQ	1.041	-18.5	-6.5	-2.1
165	PQ	1.076	-39.8	0.0	-0.0	783	PQ	1.000	-13.6	-2.6	-0.9
166	PQ	1.021	-37.8	0.0	-0.0	784	PQ	1.037	-18.7	-3.4	-1.1
167	PQ	0.865	-37.8	0.0	-0.0	785	PQ	1.013	-14.8	0.0	0.0
168	PQ	0.880	-14.1	0.0	-0.0	786	PQ	0.990	-11.2	-0.0	0.0
169	PQ	1.038	-14.1	-0.0	-0.0	787	PQ	1.041	-24.2	-2.9	-1.1
170	PV	1.088	12.0	1415.0	-22.9	788	PQ	1.023	-14.2	-0.0	0.0
171	PQ	1.095	6.6	0.0	-0.0	789	PQ	0.999	-14.7	0.0	0.0
172	PQ	1.083	-3.9	-0.0	-0.0	790	PQ	1.037	-10.0	-15.5	-5.1
173	PQ	1.089	-12.8	-0.0	0.0	791	PQ	1.048	-15.0	-10.1	-3.4
174	PQ	1.084	-14.0	-0.0	-0.0	792	PQ	1.029	-13.0	-10.4	-3.4

Tabela 4.2. Ótimo local "mais próximo"

BARRA	TIPO	V	ANG.	MW	MVAR	BARRA	TIPO	V	ANG.	MW	MVAR
175	PQ	1.100	-21.3	0.0	-0.0	793	PQ	1.029	-13.1	-10.4	-3.4
176	PQ	1.084	-27.1	-1092.0	-94.3	794	PQ	0.976	-16.8	-0.0	-0.0
177	PQ	0.999	-21.9	-0.0	-0.0	795	PQ	0.983	-15.7	-6.2	-1.9
178	PQ	0.847	-21.9	0.0	0.0	796	PQ	1.015	-1.2	-11.0	-3.6
179	PQ	1.093	-22.0	0.0	-0.0	797	PQ	0.982	-14.9	-14.4	-5.6
180	PQ	1.091	5.2	0.0	0.0	798	PQ	1.041	-1.8	-1.6	-0.5
181	PQ	1.037	3.2	-0.0	0.0	799	PQ	0.986	-14.6	-7.5	-2.5
182	PQ	1.083	3.8	-0.0	-0.0	900	PV	1.032	8.2	30.0	-3.2
183	PQ	1.036	1.7	0.0	0.0	901	PV	1.035	9.1	100.0	-2.8
184	PQ	1.036	1.7	0.0	0.0	902	PV	1.033	10.2	50.0	-10.7
185	PQ	1.052	-2.8	0.0	0.0	903	PV	1.047	9.9	233.0	-19.1
186	PQ	1.027	-1.0	0.0	0.0	904	PQ	1.070	-6.7	-50.9	-23.2
187	PQ	1.068	-4.8	-0.0	-0.0	905	PQ	1.052	-2.8	-0.0	-0.0
188	PQ	1.093	-5.7	-125.0	-63.4	907	PQ	1.064	-5.3	-151.0	-49.7
189	PQ	1.064	-5.2	0.0	-0.0	908	PQ	1.078	5.0	0.0	0.0
190	PV	1.018	-8.7	-81.5	-10.4	909	PQ	1.047	4.0	-0.0	-0.0
191	PQ	1.025	-3.7	-0.0	-0.0	910	PQ	1.048	-3.1	0.0	-0.0
196	PQ	1.043	-40.8	5.0	-16.6	911	PQ	0.989	-5.9	-50.4	16.9
200	PV	0.997	-19.1	9.0	-6.9	912	PQ	1.016	-1.5	0.0	0.0
201	PV	1.016	-23.5	0.0	-1.1	913	PQ	0.995	-4.8	-4.8	-1.6
202	PV	1.017	-22.8	80.0	45.3	914	PQ	1.021	-9.7	-19.8	-4.9
203	PV	1.019	4.6	350.0	-63.7	915	PQ	1.063	0.5	0.0	-0.0
204	PV	0.975	-20.0	18.0	8.0	916	PQ	1.060	-6.5	-29.8	-6.2
205	PV	1.027	-24.6	90.0	20.6	950	PQ	1.032	-9.4	-31.2	-17.1
206	PV	0.975	-23.3	-32.0	-197.3	953	PQ	1.053	-11.0	-0.0	0.0
207	PV	1.060	16.9	1300.0	-117.8	956	PQ	1.056	-3.8	-4.6	-2.5
208	PV	1.025	-5.7	285.0	7.2	957	PQ	1.012	-9.6	-19.8	-11.8
209	PV	1.028	7.4	300.0	-61.6	959	PQ	1.056	-16.0	0.0	0.0
211	PQ	0.915	-7.8	-75.0	-23.0	960	PQ	1.059	-13.5	0.0	-0.0
212	PQ	1.024	-11.5	-28.0	-11.0	961	PQ	1.052	-5.5	-5.2	-2.7
213	PQ	1.012	0.2	-18.0	-8.0	962	PQ	1.036	-9.7	-0.0	0.0
214	PQ	1.034	-23.0	-15.0	-2.0	963	PQ	1.037	-8.3	-5.0	-2.4
215	PQ	0.997	-19.8	-0.0	-0.0	964	PQ	1.040	-5.9	-4.9	-3.0
216	PQ	1.072	-19.1	0.0	0.0	965	PQ	1.033	-8.0	-0.0	-0.0
217	PQ	1.037	-23.7	-230.0	-110.0	966	PQ	1.026	-11.0	-0.0	-0.0
218	PQ	0.967	-19.1	-0.0	-0.0	967	PQ	1.054	-9.7	0.0	-0.0
219	PQ	1.022	-24.8	-19.0	-9.0	968	PQ	1.053	-9.7	-6.8	-3.5
220	PQ	1.018	-22.9	-72.0	-33.0	970	PQ	1.063	-11.2	-5.0	-2.4
221	PQ	1.034	-24.0	-113.0	-30.0	972	PQ	1.045	-10.2	-69.2	-37.4
222	PQ	1.023	-26.7	-19.0	-5.0	973	PQ	1.041	-3.0	-1.4	-0.7
223	PQ	1.012	-25.1	-8.0	-3.9	974	PQ	1.024	-11.1	0.0	0.0
224	PQ	0.991	-23.0	-30.0	-9.0	975	PQ	1.020	-13.6	0.0	0.0
225	PQ	1.021	-22.7	-24.0	-8.0	978	PQ	1.006	-10.9	-16.2	-9.6
226	PQ	0.984	-23.8	-10.6	-4.6	979	PQ	1.044	-7.2	0.0	0.0
227	PQ	0.997	-26.7	-34.0	-11.0	980	PQ	1.007	-11.4	-0.0	0.0
228	PQ	0.990	-23.2	-13.0	-8.0	981	PQ	1.004	-11.6	-30.0	-13.8
229	PQ	1.009	-27.2	-63.6	-29.0	982	PQ	1.028	-11.5	0.0	0.0
230	PQ	1.009	-25.0	-1.5	-0.6	983	PV	1.019	-16.0	20.0	0.5

Tabela 4.2. continuação

BARRA	TIPO	V	ANG.	MW	MVAR	BARRA	TIPO	V	ANG.	MW	MVAR
231	PQ	0.967	-22.6	-52.0	-22.0	984	PV	1.029	-15.9	40.0	-3.6
232	PQ	0.999	-24.8	-35.0	-8.0	985	PV	1.028	-16.4	70.0	11.1
233	PQ	1.016	-23.5	0.0	0.0	989	PQ	1.021	-21.9	-5.4	-2.8
234	PQ	0.995	-33.3	-70.0	-30.0	990	PQ	1.043	-24.0	-0.0	-0.0
236	PQ	1.000	-35.8	-56.0	-18.4	993	PQ	1.001	-21.2	-22.7	-10.4
237	PQ	0.999	-32.9	0.0	-0.0	994	PQ	1.000	-21.1	0.0	-0.0
238	PQ	0.991	-33.3	-245.0	-120.0	995	PQ	1.000	-21.1	-2.2	-1.0
240	PQ	1.009	-27.9	-79.4	-30.0	996	PQ	1.095	-26.1	0.0	0.0
241	PQ	0.982	-23.6	-27.9	-14.6	997	PQ	1.095	-26.1	-3.0	-1.5
242	PQ	1.030	-26.8	-62.0	-20.0	998	PQ	1.023	-19.3	0.0	0.0
243	PQ	1.053	-1.7	0.0	0.0	999	PQ	1.057	-25.6	-13.6	-8.2
244	PQ	0.985	-2.7	-0.0	0.0	1180	PQ	1.015	-18.6	-0.0	0.0
245	PQ	1.042	-0.8	-0.0	-0.0	1181	PQ	1.050	-25.3	-25.0	-14.8
246	PQ	1.053	-1.7	-0.0	0.0	1182	PQ	1.027	-18.8	0.0	0.0
247	PQ	0.986	-27.3	-64.0	-47.0	1183	PQ	1.027	-18.5	-14.5	-4.2
248	PQ	0.999	-26.6	-53.0	-26.0	1184	PQ	1.017	-19.6	-7.9	-4.9
249	PQ	0.998	-24.7	-24.0	-9.0	1185	PQ	1.033	-22.0	-15.6	-6.2
250	PQ	0.989	-18.7	-38.0	-14.0	1186	PQ	1.028	-22.0	-0.0	-0.0
252	PQ	0.971	-14.0	0.0	0.0	1187	PQ	1.027	-22.0	-4.1	-3.1
253	PQ	1.026	-14.0	0.0	0.0	1188	PQ	1.013	-21.5	-0.0	0.0
254	PQ	1.019	-21.0	-100.0	-32.0	1189	PQ	1.013	-21.5	-2.2	-1.1
255	PQ	0.986	-17.0	-0.0	0.0	1190	PQ	1.000	-19.7	0.0	0.0
256	PQ	1.026	-14.0	-0.0	-0.0	1191	PQ	1.049	-17.9	0.0	-0.0
257	PQ	1.023	-24.5	-41.0	-15.0	1193	PQ	1.025	-19.2	0.0	-0.0
258	PQ	0.987	-5.4	-38.0	-15.0	1194	PQ	1.079	-25.9	-26.0	-9.4
259	PQ	1.029	-23.7	-15.0	-7.2	1195	PQ	1.015	-21.7	0.0	0.0
260	PQ	0.983	-23.0	-18.0	-7.0	1196	PQ	1.014	-21.7	-5.0	-3.8
261	PQ	0.998	-22.3	-0.0	-0.0	1197	PQ	1.022	-19.8	0.0	0.0
262	PQ	1.000	-26.0	0.0	0.0	1203	PQ	0.999	-21.0	-14.5	-4.8
263	PQ	1.049	-11.9	0.0	0.0	1204	PQ	1.017	-21.8	-42.4	-22.9
264	PQ	1.032	-9.4	-0.0	0.0	1205	PQ	1.022	-21.8	-0.0	-0.0
265	PQ	0.983	-17.1	-27.0	-13.0	1206	PQ	1.021	-21.9	-12.0	-6.5
266	PQ	1.024	-23.1	-16.1	-9.3	1206	PQ	1.018	-21.8	-13.0	-7.0
267	PQ	1.003	-24.5	-6.0	-1.5	1210	PQ	1.073	-25.9	-7.4	-2.9
268	PQ	0.975	-4.2	-1.5	-0.7	1212	PQ	1.023	-19.5	-16.5	-9.3
269	PQ	0.973	-25.1	-160.0	-93.0	1213	PQ	1.044	-22.0	-25.0	-15.5
270	PQ	1.002	-25.6	-52.0	-24.0	1214	PQ	1.039	-22.0	0.0	0.0
271	PQ	1.039	-28.8	-1.9	-0.6	1215	PQ	1.038	-22.2	-16.0	-8.6
272	PQ	1.021	-26.3	-14.0	-1.0	1216	PQ	1.092	-17.1	0.0	0.0
273	PQ	0.992	-23.3	-35.0	-7.0	1217	PQ	1.001	-20.2	-13.4	-7.6
274	PQ	1.077	10.8	-0.0	-0.0	1218	PQ	1.025	-21.6	-0.0	-0.0
275	PQ	0.982	-23.3	-15.5	-8.4	1219	PQ	0.998	-20.7	-19.0	-11.3
276	PQ	1.100	-19.7	0.0	0.0	1220	PQ	1.005	-20.0	0.0	-0.0
277	PQ	1.093	-19.7	0.0	0.0	1221	PQ	1.005	-20.0	-3.0	-1.8
278	PQ	1.013	-24.8	-58.0	-30.0	1223	PQ	1.008	-21.0	-38.2	-22.6
279	PQ	1.037	-22.8	0.0	0.0	1224	PQ	1.007	-20.7	0.0	0.0
280	PQ	0.974	-19.7	-0.0	-0.0	1225	PQ	1.006	-20.7	-10.5	-6.2
281	PQ	1.012	-12.7	-50.0	-22.0	1226	PQ	1.032	-22.0	-0.0	-0.0

Tabela 4.2. continuação

BARRA	TIPO	V	ANG.	MW	MVAR	BARRA	TIPO	V	ANG.	MW	MVAR
282	PQ	1.000	-9.9	-0.0	-0.0	1227	PQ	1.031	-22.0	-11.2	-4.4
283	PQ	1.005	-11.1	-0.0	0.0	1229	PQ	1.000	-20.3	-0.0	-0.0
284	PQ	0.971	-4.8	-45.0	-12.0	1230	PQ	1.000	-20.3	-6.0	-3.7
285	PQ	0.991	-2.9	-39.0	-13.0	1231	PQ	1.022	-21.8	0.0	0.0
286	PQ	1.027	-38.3	-39.0	-12.0	1233	PQ	1.000	-18.5	0.0	0.0
287	PQ	1.009	-36.9	-0.0	0.0	1234	PQ	1.006	-18.4	0.0	0.0
288	PQ	1.047	3.2	0.0	0.0	1235	PQ	1.069	-26.1	-18.9	-11.7
289	PQ	0.990	-16.7	-16.0	-7.4	1236	PQ	1.020	-21.2	-34.4	-14.7
290	PQ	1.092	-17.4	-235.0	-75.0	1239	PQ	0.999	-20.3	-4.3	-2.7
501	PQ	1.075	-28.3	0.0	-0.0	1242	PV	1.053	-20.7	20.0	5.5
502	PQ	1.075	-28.3	0.0	-0.0	1243	PV	1.060	-18.1	70.0	-30.7
503	PQ	1.066	-28.4	0.0	-0.0	1245	PQ	1.087	-26.9	-0.0	0.0
504	PQ	1.066	-28.4	0.0	-0.0	1246	PQ	1.089	-24.5	0.0	-0.0
505	PQ	1.052	-33.5	-0.0	-0.0	1247	PQ	1.059	-26.4	0.0	0.0
506	PQ	0.990	-37.7	-32.0	-4.0	1248	PQ	1.040	-24.8	-15.0	-3.0
507	PQ	0.980	-29.8	0.0	-0.0	1249	PQ	1.083	-27.2	-22.0	-9.4
508	PQ	1.060	-37.1	-507.0	0.0	1250	PQ	1.077	-26.8	-20.0	-10.2
509	PQ	1.051	-33.6	-90.0	-4.0	1252	PQ	1.068	-26.7	-17.0	-10.5
510	PQ	0.975	-30.2	-0.0	0.0	1253	PQ	1.057	-26.6	-7.7	-4.2
511	PQ	0.977	-30.3	-0.0	0.0	1255	PQ	1.084	-29.8	-2.8	-1.4
512	PQ	0.973	-30.6	0.0	-0.0	1256	PQ	1.078	-30.3	-0.0	-0.0
513	PQ	1.060	-30.8	-0.0	0.0	1257	PQ	1.072	-30.5	-17.0	-7.2
515	PQ	1.048	-31.9	-212.0	-88.0	1258	PQ	1.041	-23.2	0.0	-0.0
516	PQ	1.079	-29.0	0.0	-0.0	1259	PQ	1.035	-24.7	-8.3	-4.2
517	PQ	1.022	-31.7	-120.0	-6.0	1260	PQ	1.057	-25.7	0.0	-0.0
518	PQ	1.042	-31.3	-114.0	-5.0	1262	PQ	1.033	-22.0	-3.8	-2.1
519	PQ	1.075	-28.6	0.0	0.0	1263	PQ	1.035	-24.9	-5.7	-2.9
520	PQ	1.075	-28.6	0.0	0.0	1264	PQ	1.078	-30.3	0.0	0.0
523	PQ	1.073	-27.6	-0.0	-0.0	1266	PQ	1.037	-24.2	-0.0	-0.0
524	PQ	1.051	-33.7	-370.0	-17.0	1267	PQ	1.032	-24.4	-6.2	-3.2
527	PQ	1.058	-30.9	0.0	-0.0	1268	PQ	1.035	-25.0	-14.1	-6.8
528	PV	1.034	-29.7	95.0	126.5	1269	PQ	1.037	-22.5	0.0	0.0
529	PQ	1.021	-37.7	-141.0	-58.0	1272	PQ	1.022	-25.5	-13.0	-8.0
530	PV	0.979	-35.6	65.0	13.2	1273	PQ	1.067	-25.2	0.0	-0.0
531	PQ	1.025	-36.6	-207.0	-17.0	1274	PQ	1.067	-25.2	-7.3	-3.5
532	PV	0.946	-34.9	70.0	-73.1	1275	PQ	1.061	-25.1	-3.5	-2.2
533	PQ	0.980	-29.2	0.0	0.0	1276	PQ	1.064	-25.7	-1.1	-0.4
534	PQ	1.061	-30.5	-0.0	-0.0	1277	PQ	1.079	-23.1	-0.9	-0.8
536	PQ	0.971	-30.0	-0.0	-0.0	1278	PQ	1.047	-23.9	-23.2	-11.9
538	PQ	1.041	-35.0	-518.5	-9.0	1279	PQ	1.036	-23.9	-5.7	-2.9
539	PQ	0.972	-26.8	-0.0	0.0	1281	PQ	1.063	-25.7	-17.8	-9.1
540	PQ	1.065	-28.9	0.0	0.0	1283	PQ	1.072	-25.1	-1.1	-0.5
541	PQ	1.068	-28.9	-0.0	0.0	1285	PQ	1.078	-27.7	-18.6	-10.0
542	PQ	1.068	-28.9	-24.0	-13.0	1286	PQ	1.063	-25.3	-25.3	-21.7
543	PQ	1.044	-32.8	-155.0	-11.0	1288	PQ	1.067	-25.2	-16.6	-8.4
544	PQ	0.967	-25.8	-0.0	-0.0	1290	PQ	1.084	-27.3	-9.4	-3.1
545	PQ	1.032	-32.4	-190.0	0.0	1292	PQ	1.076	-27.7	0.0	-0.0
546	PQ	1.060	-27.8	0.0	0.0	1293	PQ	1.074	-27.7	-0.0	-0.0

Tabela 4.2. continuação

BARRA	TIPO	V	ANG.	MW	MVAR	BARRA	TIPO	V	ANG.	MW	MVAR
547	PQ	1.041	-33.5	-388.0	0.0	1295	PQ	1.060	-27.6	-18.3	-7.6
549	PQ	1.078	-26.1	0.0	0.0	1297	PQ	1.069	-25.0	-13.0	-6.7
550	PQ	1.060	-30.3	-200.0	-2.0	1299	PQ	1.067	-25.2	-4.9	-2.4
551	PQ	1.060	-30.6	0.0	0.0	1300	PQ	1.059	-45.4	0.0	-0.0
552	PV	1.007	-30.6	0.0	-50.7	1301	PQ	1.063	-47.9	-17.7	-8.7
553	PQ	1.036	-34.3	-183.0	-17.0	1302	PQ	1.049	-46.5	-36.0	-25.5
554	PV	1.005	-34.3	0.0	-13.2	1303	PQ	1.044	-46.5	-2.5	-1.0
555	PQ	1.065	-28.9	-0.0	0.0	1304	PQ	1.059	-49.4	-1.5	-0.9
556	PQ	1.040	-34.3	-489.0	-11.0	1305	PQ	1.046	-46.6	-0.0	0.0
565	PQ	0.970	-30.4	0.0	0.0	1306	PQ	1.047	-46.3	0.0	0.0
567	PQ	1.002	-36.8	-392.0	-3.0	1307	PQ	1.073	-48.1	-12.1	-7.0
568	PQ	1.056	-32.2	0.0	-0.0	1308	PV	1.053	-48.3	0.0	-12.9
569	PQ	0.998	-37.2	-230.0	-46.0	1309	PQ	1.039	-46.6	-85.0	-50.0
571	PQ	0.973	-31.6	0.0	0.0	1310	PQ	1.040	-46.6	-78.0	-48.0
572	PQ	1.031	-41.3	-567.0	-13.0	1311	PQ	1.049	-46.0	0.0	0.0
574	PQ	1.061	-30.0	-73.0	-12.0	1312	PQ	1.055	-44.4	0.0	0.0
575	PQ	1.068	-28.0	-123.0	-23.0	1313	PV	1.037	-40.2	30.3	-5.7
576	PQ	0.981	-29.6	-0.0	-0.0	1314	PQ	1.025	-43.3	-0.0	0.0
578	PQ	0.966	-25.5	-0.0	-0.0	1315	PQ	1.056	-40.4	-0.0	0.0
579	PQ	0.967	-26.0	0.0	0.0	1316	PV	1.053	-35.0	118.6	1.9
580	PQ	1.061	-27.2	0.0	0.0	1319	PQ	1.043	-44.2	-24.6	-12.0
581	PQ	1.066	-28.5	-0.0	-0.0	1320	PQ	1.027	-44.8	-8.7	-3.4
582	PQ	0.984	-27.4	0.0	0.0	1321	PQ	1.043	-44.4	-10.5	-6.0
584	PQ	0.977	-25.5	0.0	0.0	1322	PQ	1.012	-44.8	-4.2	-2.5
585	PQ	0.970	-26.5	0.0	0.0	1323	PQ	1.020	-43.8	-3.6	-1.8
600	PV	1.078	12.4	690.0	-66.1	1324	PQ	1.028	-42.9	0.0	0.0
601	PV	1.063	0.7	500.0	48.0	1325	PV	1.052	-40.2	15.0	-0.5
602	PV	1.080	9.8	2645.0	-447.1	1326	PQ	1.053	-49.5	-15.7	-9.2
603	PV	1.093	9.5	1130.0	76.5	1327	PQ	1.061	-49.2	-13.5	-7.2
604	PV	1.029	4.9	190.0	-51.5	1328	PQ	1.051	-49.6	-12.5	-6.0
612	PQ	1.074	-11.0	0.0	-0.0	1329	PQ	1.052	-49.6	-4.9	-3.0
613	PQ	1.025	-14.2	-0.0	0.0	1330	PQ	1.054	-49.5	-10.6	-6.0
614	PQ	1.052	-8.9	0.0	0.0	1331	PQ	1.063	-49.5	0.0	0.0
616	PQ	1.102	8.3	0.0	0.0	1332	PQ	1.057	-48.3	0.0	0.0
617	PQ	1.089	7.9	0.0	-0.0	1333	PQ	1.074	-48.3	-0.0	-0.0
619	PQ	1.075	-10.6	0.0	-0.0	1334	PQ	1.068	-48.3	-0.0	0.0
620	PQ	1.065	-13.7	-0.0	-0.0	1335	PQ	1.042	-46.6	-103.0	-26.0
621	PQ	1.079	-23.5	-0.0	0.0	1336	PQ	1.043	-39.3	-0.0	0.0
622	PQ	1.079	-25.4	0.0	-0.0	1337	PQ	1.063	-49.5	0.0	0.0
623	PQ	1.101	-25.3	-1.9	-1.2	1338	PQ	1.049	-43.5	-0.0	-0.0
625	PQ	1.059	-5.0	0.0	0.0	1339	PQ	1.045	-44.9	-2.5	-1.0
626	PQ	1.079	-8.3	-0.6	-0.4	1340	PQ	1.051	-42.7	-5.5	-2.5
627	PQ	1.071	-25.1	-0.0	-0.0	1342	PQ	1.020	-45.1	-2.2	-1.0
628	PQ	0.986	-27.0	-0.0	0.0	1343	PQ	1.038	-45.2	-1.0	-0.3
629	PQ	1.095	-26.4	-0.0	-0.0	1344	PQ	1.013	-45.9	-4.3	-2.2
630	PV	1.013	-25.1	0.0	-147.0	1400	PQ	0.998	-26.6	-2.4	-0.9
631	PQ	1.074	-27.4	-0.0	-0.0	1401	PQ	0.999	-11.5	-15.5	-5.1
633	PQ	1.093	6.4	0.0	0.0	1402	PQ	1.039	-13.4	0.0	-0.0

Tabela 4.2. continuação

BAHIA	TIPO	V	ANG.	MW	MVAR	BAHIA	TIPO	V	ANG.	MW	MVAR
634	PQ	1.091	5.0	0.0	0.0	1403	PQ	1.008	-12.7	-6.7	-2.2
635	PQ	1.085	-0.0	-92.3	33.9	1404	PQ	1.005	-8.8	-3.2	-1.1
643	PQ	1.077	-18.0	-0.0	0.0	1405	PQ	1.038	-22.5	-19.7	-7.0
644	PQ	1.049	-21.4	-0.0	0.0	1406	PQ	1.044	-22.0	-11.9	-4.3
649	PQ	1.078	-24.2	-0.0	0.0	1407	PQ	1.014	-16.5	-2.1	-0.7
650	PQ	0.977	-25.5	-0.0	0.0	1408	PQ	1.056	6.1	-0.0	-0.0
651	PQ	1.105	-26.2	-0.0	-0.0	1409	PQ	1.022	-11.3	-5.1	-8.5
655	PQ	1.087	-23.5	-0.0	0.0	1410	PQ	1.041	-21.9	-16.0	-5.8
656	PQ	1.068	-28.0	0.0	-0.0	1411	PQ	0.967	-13.1	-1.8	-0.6
657	PQ	1.061	-30.0	-0.0	-0.0	1412	PQ	1.009	-7.5	-31.8	-10.5
662	PV	1.050	-10.2	90.0	-21.2	1413	PQ	1.010	-3.0	-0.0	0.0
663	PV	0.954	-7.6	70.0	-12.6	1414	PQ	1.051	-24.4	0.0	0.0
664	PV	1.096	-9.9	300.0	51.9	1415	PQ	1.013	-16.2	-2.6	-0.9
666	PQ	1.080	-15.9	-0.0	0.0	1416	PQ	1.040	-22.0	-8.3	-3.0
667	PQ	1.087	-18.0	-0.0	-0.0	1417	PQ	1.025	-21.7	-3.6	-3.1
669	PQ	1.075	-13.0	-267.0	-15.0	1418	PQ	1.030	-22.1	-8.3	-3.0
670	PQ	1.068	-19.5	-0.0	-0.0	1419	PQ	1.030	-21.9	0.0	0.0
671	PQ	1.065	-19.4	-29.4	-28.4	1420	PQ	1.030	-23.0	-5.8	-2.1
672	PQ	1.051	-22.3	0.0	-0.0	1421	PQ	1.016	-12.9	-10.8	-3.6
673	PQ	1.075	-24.7	-2.0	-1.4	1422	PQ	1.043	-22.0	-3.1	-1.1
674	PQ	1.074	-24.0	0.0	0.0	1423	PQ	0.971	-17.0	-7.1	-2.3
675	PQ	1.070	-25.0	-1.0	-0.6	1424	PQ	1.007	-13.9	-3.1	-1.0
676	PQ	1.080	-13.5	-0.0	0.0	1425	PQ	1.041	-8.6	-0.0	-0.0
677	PQ	1.079	-13.4	0.0	0.0	1426	PQ	1.025	-23.3	-14.8	-5.4
678	PQ	1.064	-12.6	-57.3	-4.9	1427	PQ	0.977	-11.1	-11.5	-3.8
679	PQ	1.078	-26.0	-0.0	-0.0	1428	PQ	1.042	-21.9	-7.3	-2.7
681	PQ	1.086	-14.0	-133.0	-15.0	1429	PQ	1.044	-22.0	-4.8	-1.7
682	PQ	1.096	-16.4	-20.7	-6.9	1430	PQ	1.021	-3.0	-15.8	-5.2
685	PV	1.097	-15.2	60.0	60.3	1431	PQ	1.045	-21.9	-8.0	-2.9
686	PV	1.040	-7.4	80.0	-13.2	1432	PQ	0.997	-11.6	-20.0	-6.6
688	PV	1.040	-11.4	60.0	-26.9	1433	PQ	0.997	-13.4	-22.1	-7.3
689	PV	1.040	-6.5	120.0	-1.3	1434	PQ	0.997	-13.4	0.0	-0.0
692	PQ	1.067	-2.6	-17.0	-10.1	1435	PQ	1.012	-13.5	-2.8	-0.9
693	PQ	1.037	-8.5	-0.0	-0.0	1436	PQ	1.030	-24.9	-2.2	-0.8
694	PQ	1.007	-10.0	-11.8	-5.7	1437	PQ	1.047	-24.5	-0.0	-0.0
695	PQ	1.061	-17.2	-0.0	-0.0	1438	PQ	1.040	-24.6	-0.7	-0.2
697	PQ	1.030	-11.7	-12.6	-7.8	1439	PQ	1.030	-23.1	-6.6	-2.4
699	PQ	1.007	-10.5	-17.7	-11.0	1440	PQ	0.994	-7.1	-3.1	-1.0
700	PQ	1.053	-14.6	-6.1	-2.0	1441	PV	0.997	-18.5	-7.0	-48.8
701	PQ	1.037	-22.4	-18.2	-6.6	1442	PQ	1.021	-20.0	-3.7	-1.2
702	PQ	1.039	-23.9	-0.0	0.0	1443	PQ	1.049	-21.4	0.0	0.0
703	PV	1.040	-20.9	30.0	-4.5	1444	PQ	1.047	-21.6	-10.4	-3.8
704	PQ	1.042	-24.1	-11.9	-5.4	1445	PQ	1.034	-24.4	-8.0	-2.9
705	PQ	1.046	-26.1	-20.3	-7.4	1446	PQ	0.994	-15.4	-0.6	-0.2
706	PQ	1.039	-10.5	-0.0	-0.0	1447	PQ	1.027	-13.5	-6.4	-2.1
707	PQ	1.035	-8.7	-17.2	-5.6	1448	PQ	0.997	-13.3	-15.5	-5.1
708	PQ	1.019	-14.1	-11.7	-3.9	1449	PQ	1.021	-13.2	0.0	0.0
709	PV	1.018	-14.3	-13.0	-51.7	1450	PQ	1.058	-19.9	-6.7	-2.2

Tabela 4.2. continuação

BARRA	TIPO	V	ANG.	MW	MVAR	BARRA	TIPO	V	ANG.	MW	MVAR
710	PQ	1.025	-14.2	0.0	0.0	1451	PQ	0.993	-12.2	-2.0	-0.7
711	PQ	1.035	-11.8	-2.8	-0.9	1452	PQ	1.018	-11.9	0.0	0.0
712	PV	1.000	-7.7	30.0	7.3	1453	PQ	1.012	-12.4	-16.2	-5.3
713	PQ	1.009	-12.1	-7.0	-2.3	1454	PQ	0.999	-14.5	-10.4	-3.4
714	PQ	1.015	-1.1	-0.0	-0.0	1455	PQ	1.010	-14.0	0.0	0.0
715	PQ	1.042	-4.4	-14.1	-4.6	1456	PQ	1.051	-24.7	2.7	-2.0
716	PQ	1.055	-14.4	-15.5	-5.1	1457	PQ	0.966	-13.3	-6.3	-2.1
717	PQ	1.061	-14.0	0.0	0.0	1458	PQ	1.032	-24.8	-2.0	-0.7
718	PQ	1.060	-14.0	-0.0	0.0	1459	PQ	1.029	-22.9	-14.7	-5.3
719	PQ	1.051	-16.5	-20.6	-6.8	1460	PQ	1.004	-15.2	-6.6	-2.2
720	PQ	1.061	-17.2	0.0	-0.0	1461	PQ	1.048	-21.8	7.7	0.0
721	PV	1.022	-19.5	-19.5	-16.7	1462	PQ	1.056	-24.6	-0.0	0.0
722	PQ	0.994	-7.0	-15.0	-4.9	1463	PQ	1.047	-21.9	-13.8	-5.0
723	PQ	1.039	-8.9	0.0	-0.0	1464	PQ	1.043	-22.0	-4.1	-1.5
724	PQ	1.043	-24.6	-17.2	-6.2	1465	PQ	1.055	-14.4	-17.0	-5.6
725	PQ	0.998	-17.0	-0.5	-0.2	1466	PQ	1.042	-22.0	-5.1	-1.7
726	PQ	1.041	-22.3	-9.9	-3.6	1467	PQ	1.045	-24.9	-0.0	0.0
727	PQ	1.013	-11.9	-7.4	-2.4	1468	PQ	1.024	-25.7	-12.4	-4.5
728	PQ	1.023	-23.5	-25.4	-9.2	1469	PQ	1.023	-23.5	-31.1	-11.3
729	PQ	1.039	-18.6	-0.7	-0.2	1470	PQ	1.051	-25.7	0.0	0.0
730	PQ	1.062	-19.7	-14.5	-4.8	1471	PV	1.000	-7.8	7.8	-7.1
731	PQ	1.029	-13.4	-4.2	-1.4	1472	PQ	1.021	-14.3	-11.7	-3.7
732	PQ	1.015	-11.7	-3.6	-1.2	1473	PQ	1.002	-15.1	-0.7	-0.1
733	PQ	1.003	-20.4	-2.3	-0.8	1474	PQ	1.000	-21.2	-0.6	-0.2
734	PQ	0.987	-19.6	-0.9	-0.3	1475	PQ	1.033	-22.0	-13.5	-4.9
735	PQ	0.987	-15.8	-0.6	-0.2	1476	PQ	1.047	-26.0	-10.4	-3.8
736	PQ	1.037	-22.5	-15.5	-5.6	1477	PQ	1.044	-7.2	0.0	0.0
737	PQ	1.044	-26.1	-25.4	-9.2	1478	PQ	1.001	-12.8	-20.0	-6.6
738	PQ	1.037	-24.1	-14.2	-5.2	1479	PQ	0.983	-16.8	-1.2	-0.4
739	PQ	0.968	-27.3	-7.5	-2.7	1480	PQ	1.030	-23.1	0.0	0.0
740	PQ	1.043	-21.9	-0.0	-0.0	1481	PQ	1.027	-23.2	-0.6	-3.5
741	PQ	1.039	-23.9	-0.0	-0.0	1482	PQ	1.027	-10.6	-3.7	-1.2
742	PQ	1.041	-21.9	-6.7	-2.4	1483	PQ	1.028	-11.5	-3.1	-1.0
743	PQ	1.023	-23.5	-12.4	-4.5	1484	PQ	1.040	-21.9	-3.1	-1.0
744	PQ	1.030	-23.3	-2.6	-0.9	1485	PQ	1.021	-13.2	-2.1	-0.7

Tabela 4.2. continuação

BARRA	TENSÃO *	TENSÃO **	BARRA	TENSÃO *	TENSÃO **
104	1,030	1,049	604	1,015	1,029
100	1,040	1,045	630	1,000	1,013
101	1,020	1,042	662	1,040	1,050
102	0,995	0,994	663	0,950	0,954
103	1,035	1,038	664	1,040	1,096
107	1,025	1,073	685	1,030	1,097
125	1,030	1,061	686	1,040	1,040
130	0,937	0,943	688	1,030	1,040
170	1,000	1,088	689	1,040	1,040
190	1,010	1,018	703	1,010	1,040
200	1,000	0,997	709	0,960	1,018
201	1,020	1,016	712	1,000	1,000
202	1,020	1,017	721	1,000	1,022
203	1,020	1,019	765	1,000	1,000
204	0,976	0,975	900	1,030	1,032
205	1,030	1,027	901	1,030	1,035
206	1,000	0,975	902	1,030	1,033
207	1,025	1,060	903	1,030	1,047
208	1,030	1,025	983	1,020	1,019
209	1,020	1,028	984	1,030	1,029
528	1,016	1,034	985	1,030	1,028
530	0,977	0,979	1242	1,000	1,053
532	0,942	0,946	1243	1,010	1,000
552	1,000	1,007	1308	1,050	1,053
554	1,000	1,005	1313	1,030	1,037
600	1,030	1,078	1316	1,050	1,053
601	1,025	1,063	1325	1,030	1,052
602	1,039	1,080	1441	1,000	0,997
603	1,025	1,093	1471	1,000	1,000

Tabela 4.3. Magnitudes das tensões das barras PV e slack (104).

* valor inicial

** valor final

NI	NF	TAPMIN	TAP *	TAP **	TAPMAX
109	108	0,915	0,982	0,984	1,107
120	121	0,832	0,877	0,877	1,007
122	123	0,873	0,905	0,904	1,057
141	160	0,912	0,964	0,968	1,117
165	163	0,912	1,017	1,015	1,166
191	188	0,869	0,920	0,920	1,052
189	190	0,900	0,997	1,027	1,100
217	218	0,993	1,078	1,162	1,202
217	218	0,993	1,078	1,162	1,202
217	218	0,993	1,078	1,135	1,202
244	245	0,945	1,033	0,945	1,155
278	280	0,947	1,124	1,142	1,158
279	280	0,923	1,057	1,071	1,128
910	904	0,900	0,941	0,941	1,100
906	907	0,850	0,973	0,973	1,050
911	914	0,885	0,950	0,950	1,070
915	916	0,888	0,970	0,970	1,097
1303	1304	0,746	1,014	1,006	1,167
1303	1304	0,746	1,014	1,006	1,167
1303	1304	0,746	1,014	1,005	1,167
1303	1304	0,746	1,014	1,005	1,167
1319	1320	0,900	1,005	1,005	1,100
1338	1339	0,900	0,995	0,995	1,100

Tabela 4.4. Transformadores com tap variável.

* valor inicial ** valor final

NI - n.º inicial NF - n.º final

A tabela 4.5 e o gráfico da fig. 4.3 mostram a evolução das perdas (MW) durante o processo de otimização, que com a versão adotada, resultou numa minimização de aproximadamente 50MW. Os ajustes nas variáveis de controle foram de, no máximo, 8% para os tap's e 9% para as magnitudes das tensões das barras PV.

Passo	Perdas (MW)	Nº de fatora ções	Pond. (s)	Penal. $\sum w_j$	Violação máx. (pu)
0	639,2	0	100	1,5	0,011
1	567,4	4	100	123,9	0,038
2	576,5	7	200	48,1	0,022
3	583,5	10	400	18,2	0,014
4	587,8	13	400	4,1	0,008
5	589,4	15	400	1,3	0,005

Tabela 4.5. Evolução do processo de otimização.

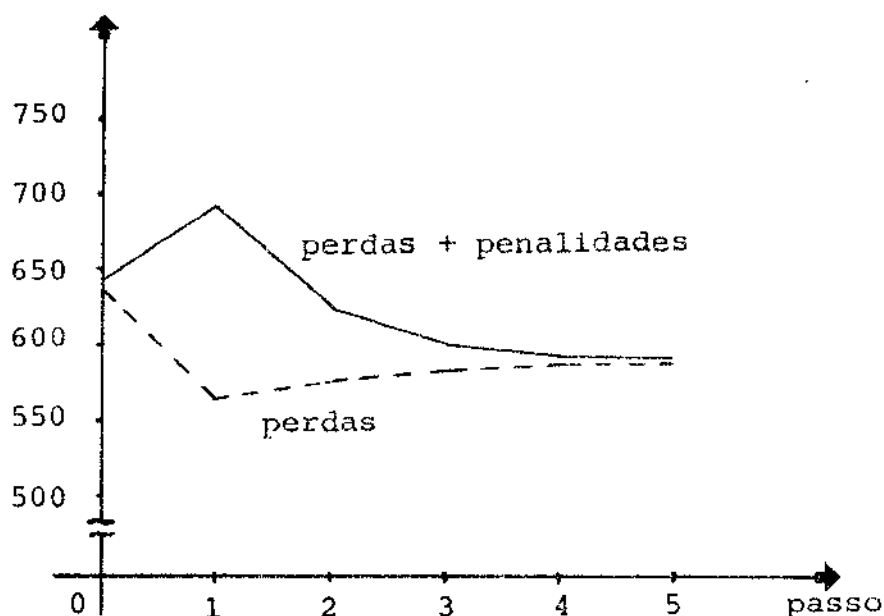


Fig. 4.3. Evolução da função objetivo.

O fator de penalidade s (vide 3.4.6) foi o mesmo para todas as barras PQ com limites de tensão violados, sendo modificado apenas de um passo a outro do processo de otimização, de acordo com o seguinte procedimento:

- . O fator s é multiplicado por 2 se após cada passo, com exceção do primeiro, a violação máxima das magnitudes das tensões das barras PQ, não ficar reduzida pela metade em relação à violação máxima do ponto anterior.

CAPÍTULO V

COMENTÁRIOS

O método Dommel-Tinney exige uma calibração adequada do fator de penalidade s e do passo exploratório da busca unidimensional, seja quadrática ou cúbica [4]. Caso contrário, não se obtém convergência ou então o tempo de execução é inaceitável.

Assim sendo, a confiabilidade da convergência e a dependência muito forte da escolha do passo exploratório, variando muito de sistema para sistema, justificam o abandono dos métodos de Gradiente Ótimo, neste trabalho. Isto foi observado em testes realizados com os sistemas: Ward-Hale [19], AEP-30 [20], Furnas e Sudeste.

Por outro lado, o método Hessiano Aproximado mostrou-se mais regular, não apresentando problemas para os sistemas testados, com bom desempenho, em particular, para o Sistema Interligado da Região Sudeste do Brasil, que além de ser um sistema com grande interesse prático, é também o que apresenta maior grau de dificuldade.

A meta principal deste trabalho foi a implementação de um método eficiente de cálculo do fluxo de carga ótimo, aplicável a um sistema real, complexo e de grande porte. Com este programa em funcionamento, outras formulações para o problema do controle reativo/tensão bem como outras funções objetivo poderão ser estudadas.

De imediato, as próprias limitações do programa atual sugerem os próximos passos no desenvolvimento futuro do trabalho, com melhorias na metodologia adotada e com a implementação de novos fatores que permitam uma representação mais completa do sistema. Tais passos deverão ser no sentido de incluir os limites nas injeções de potência ativa e reativa, e nos fluxos de po

tência ativa nas ligações. Funções objetivo que visem a resolução do problema do controle corretivo estão em fase inicial de estudos. Outro ponto que deverá receber maior atenção é o estudo de novas políticas de penalidades que possam tornar mais eficazes os métodos de otimização, em particular a do Hessiano Aproximado.

APÊNDICE I

DETALHES DE CÁLCULO - MÉTODO DOMMEL-TINNEY

I.1. Fluxo de Carga

O sistema linear

$$J^v \Delta \underline{x} = -\underline{g}(\underline{x}^v, \underline{y}) \quad (I.1)$$

pode ser reescrito na forma:

$$\begin{bmatrix} J_1 & J_3 \\ J_2 & J_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (I.2)$$

com

$$J_1 \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_l} = V_k V_l (G_{kl} \sin \theta_{kl} - B_{kl} \cos \theta_{kl}) \\ \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} = -V_k \sum_{l \in \Omega} V_l (G_{kl} \sin \theta_{kl} - B_{kl} \cos \theta_{kl}) \end{array} \right. \quad (I.3)$$

$$J_2 \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_l} = -V_k V_l (G_{kl} \cos \theta_{kl} + B_{kl} \sin \theta_{kl}) \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} = V_k \sum_{l \in \Omega} V_l (G_{kl} \cos \theta_{kl} + B_{kl} \sin \theta_{kl}) \end{array} \right. \quad (I.4)$$

$$J_3 \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial P_k}{\partial V_l} = V_k (G_{kl} \cos \theta_{kl} + B_{kl} \sin \theta_{kl}) \\ \frac{\partial P_k}{\partial V_k} = 2 V_k G_{kk} + \sum_{l \in \Omega} V_l (G_{kl} \cos \theta_{kl} + B_{kl} \sin \theta_{kl}) \end{array} \right. \quad (I.5)$$

$$J_4 \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial Q_k}{\partial V_l} = V_k (G_{kl} \sin \theta_{kl} - B_{kl} \cos \theta_{kl}) \\ \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = -2 V_k B_{kk} + \sum_{l \in \Omega} V_l (G_{kl} \sin \theta_{kl} - B_{kl} \cos \theta_{kl}) \end{array} \right. \quad (I.6)$$

Comparando-se J_1 com J_4 e J_2 com J_3 , observa-se que é possível obter uma matriz Jacobiana com dimensão de potência e um vetor dependente adimensional, através da transformação de (I.2) em:

$$\begin{array}{|c|c|} \hline J_1 & J_3' \\ \hline J_2 & J_4' \\ \hline \end{array} \cdot \begin{array}{|c|} \hline \Delta\theta \\ \hline \Delta V/V \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline \Delta P \\ \hline \Delta Q \\ \hline \end{array} \quad (I.7)$$

com

$$J_3' \left\{ \begin{array}{l} V_\ell \frac{\partial P_k}{\partial V_\ell} = V_k V_\ell (G_{k\ell} \cos\theta_{k\ell} + B_{k\ell} \sin\theta_{k\ell}) \\ V_k \frac{\partial P_k}{\partial V_k} = 2 V_k^2 G_{kk} + V_k \sum_{\ell \in \Omega} V_\ell (G_{k\ell} \cos\theta_{k\ell} + B_{k\ell} \sin\theta_{k\ell}) \end{array} \right. \quad (I.8)$$

$$J_4' \left\{ \begin{array}{l} V_\ell \frac{\partial Q_k}{\partial V_\ell} = V_k V_\ell (G_{k\ell} \sin\theta_{k\ell} - B_{k\ell} \cos\theta_{k\ell}) \\ V_k \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = -2 V_k^2 B_{kk} + V_k \sum_{\ell \in \Omega} V_\ell (G_{k\ell} \sin\theta_{k\ell} - B_{k\ell} \cos\theta_{k\ell}) \end{array} \right. \quad (I.9)$$

Comumente, (I.7) é escrito como:

$$\begin{array}{|c|c|} \hline H & N \\ \hline J & L \\ \hline \end{array} \cdot \begin{array}{|c|} \hline \Delta\theta \\ \hline \Delta V/V \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline \Delta P \\ \hline \Delta Q \\ \hline \end{array} \quad (I.10)$$

com

$$H_{kl} = V_k V_l (G_{kl} \operatorname{sen}\theta_{kl} - B_{kl} \cos\theta_{kl}) \quad (I.11)$$

$$H_{kk} = -V_k \sum_{l \in \Omega} V_l (G_{kl} \operatorname{sen}\theta_{kl} - B_{kl} \cos\theta_{kl})$$

$$J_{kl} = -V_k V_l (G_{kl} \cos\theta_{kl} + B_{kl} \operatorname{sen}\theta_{kl}) \quad (I.12)$$

$$J_{kk} = V_k \sum_{l \in \Omega} V_l (G_{kl} \cos\theta_{kl} + B_{kl} \operatorname{sen}\theta_{kl})$$

$$N_{kl} = V_k V_l (G_{kl} \cos\theta_{kl} + B_{kl} \operatorname{sen}\theta_{kl}) \quad (I.13)$$

$$N_{kk} = 2 V_k^2 G_{kk} + V_k \sum_{l \in \Omega} V_l (G_{kl} \cos\theta_{kl} + B_{kl} \operatorname{sen}\theta_{kl})$$

$$L_{kl} = V_k V_l (G_{kl} \operatorname{sen}\theta_{kl} - B_{kl} \cos\theta_{kl}) \quad (I.14)$$

$$L_{kk} = -2 V_k^2 B_{kk} + V_k \sum_{l \in \Omega} V_l (G_{kl} \operatorname{sen}\theta_{kl} - B_{kl} \cos\theta_{kl})$$

Conclui-se que para se formar a matriz Jacobiana, basta calcular os elementos das submatrizes H e J uma vez que, por comparação de (I.11) com (I.14) e de (I.12) com (I.13), valem as relações:

$$L_{k\ell} = H_{k\ell}$$

$$L_{kk} = -H_{kk} - 2 V_k^2 B_{kk}$$

(I.15)

$$N_{k\ell} = -J_{k\ell}$$

$$N_{kk} = J_{kk} + 2 V_k^2 G_{kk}$$

Formada a matriz Jacobiana e obtidos os erros entre os valores especificados e os calculados para as injeções de potência:

$$\Delta P_k^v = P_k^{esp} - P_k(\underline{V}^v, \underline{\theta}^v) \quad p/k \in (PQ \cup PV)$$

(I.16)

$$\Delta Q_k^v = Q_k^{esp} - Q_k(\underline{V}^v, \underline{\theta}^v) \quad p/k \in PQ$$

resolve-se o sistema (I.10) e aplicam-se as correções nas variáveis dependentes:

$$V_k^{v+1} = V_k^v + \Delta V_k \quad p/k \in PQ$$

(I.17)

$$\theta_k^{v+1} = \theta_k^v + \Delta \theta_k \quad p/k \in (PQ \cup PV)$$

I.2. Representação de Transformador

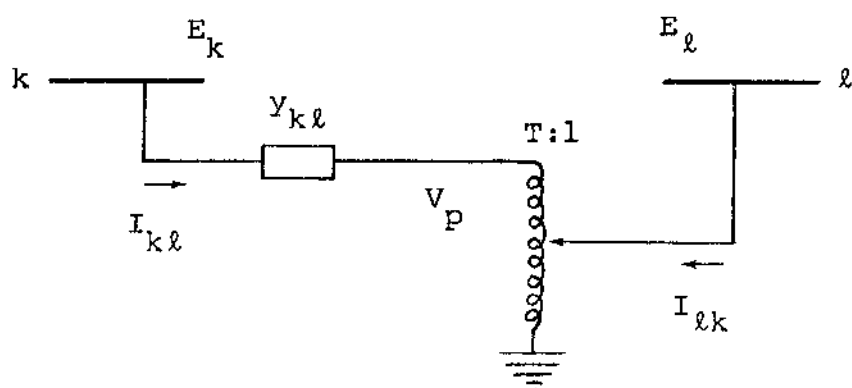


Fig. I.1 - Transformador com tap variável

Relações extraídas da Fig. I.1:

$$\frac{E_{\ell}}{E_p} = \frac{1}{T} \quad \text{ou} \quad E_p = T \cdot E_{\ell}$$

$$E_{\ell} \cdot I_{\ell k}^* = -E_p \cdot I_{k \ell}^*$$

$$\frac{I_{\ell k}}{I_{k \ell}} = - \frac{E_p^*}{E_{\ell}^*} = -T^* = -T \quad \left[\begin{array}{c} \text{transformador} \\ \text{em fase} \end{array} \right]$$

Portanto:

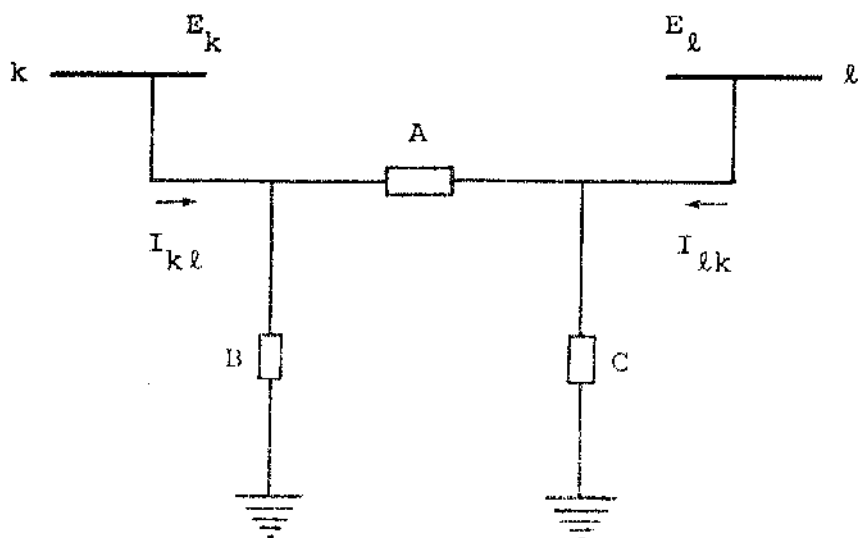
$$I_{\ell k} = -T \cdot I_{k \ell} = -T \cdot (E_k - E_p) \cdot Y_{k \ell}$$

$$I_{\ell k} = -T \cdot (E_k - T \cdot E_{\ell}) \cdot Y_{k \ell}$$

$$I_{lk} = -T \cdot Y_{kl} \cdot E_k + T^2 \cdot Y_{kl} \cdot E_l \quad (I.18)$$

e

$$I_{kl} = Y_{kl} \cdot E_k - T \cdot Y_{kl} \cdot E_l \quad (I.19)$$

Fig. I.2 - Circuito π equivalente

Da Fig. I.2:

$$I_{lk} = -A \cdot E_k + (A + C) \cdot E_l \quad (I.20)$$

e

$$I_{kl} = (A + B) \cdot E_k - A \cdot E_l \quad (I.21)$$

Confrontando (I.18) com (I.20) e (I.19) com (I.21),
 resulta:

$$A = T \cdot Y_{k\ell}$$

$$B = (1 - T) \cdot Y_{k\ell} \quad (I.22)$$

$$C = T \cdot (T - 1) \cdot Y_{k\ell}$$

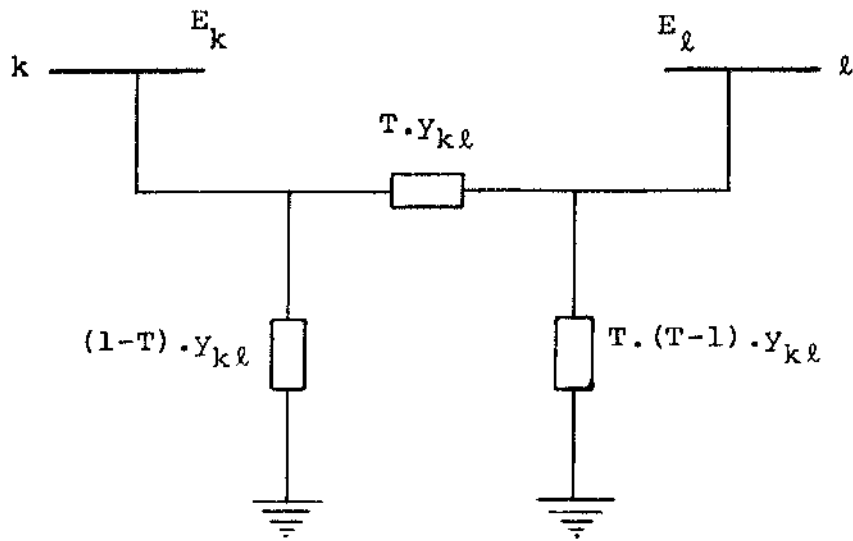


Fig. I.3 - Circuito π equivalente

Na matriz admitância Y tem-se:

	coluna k	coluna l
linha k	$\begin{array}{c} \\ +Y_{k\ell} \\ \end{array}$	$\begin{array}{c} \\ -T \cdot Y_{k\ell} \\ \end{array}$
linha l	$\begin{array}{c} \\ -T \cdot Y_{k\ell} \\ \end{array}$	$\begin{array}{c} \\ +T^2 \cdot Y_{k\ell} \\ \end{array}$

(I.23)

I.3. Multiplicadores de Lagrange

Na formulação do problema não restringido (item 3.4.4.), tem-se como uma das condições necessárias de mínimo:

$$\underline{L}_x = \underline{f}_x + [\underline{g}_x]^t \cdot \underline{\lambda} = \underline{0} \quad (I.24)$$

ou

$$[\underline{g}_x]^t \cdot \underline{\lambda} = -\underline{f}_x \quad (I.25)$$

com

$$\underline{g}_x = \frac{\partial \underline{g}}{\partial \underline{x}} \quad \text{e} \quad \underline{f}_x = \frac{\partial \underline{f}}{\partial \underline{x}}$$

O lado direito de (I.25) pode assumir formas diferentes, dependendo da função objetivo adotada. Por exemplo, no caso de ocorrerem violações nas restrições de desigualdade funcionais, deve-se trabalhar com a função com penalidades f_p definida em (3.27) e explicitada na expressão (I.26) dada adiante, a qual engloba dois casos:

a) função objetivo do tipo: $f = \sum K_i$, onde K_i é o custo de geração da potência P_{Gi} na barra i , inclusive para a barra de folga.

b) função objetivo: perdas no sistema de transmissão.

$$\begin{array}{|c|c|} \hline H & N \\ \hline J & L \\ \hline \end{array} \cdot \begin{array}{|c|} \hline \lambda_P \\ \hline \lambda_Q \\ \hline \end{array} = z \cdot \begin{array}{|c|} \hline H_1 \\ \hline N_1 \\ \hline \end{array} - \begin{array}{|c|} \hline \sum \frac{\partial w_j}{\partial \theta} \\ \hline \sum \frac{\partial w_j}{\partial v} \cdot v \\ \hline \end{array} \quad (I.26)$$

$$\text{- para o caso a) : } z = \frac{d K_1}{d P_{G1}}$$

$$\text{- para o caso b) : } z = 1$$

$$\text{- } H_1 = \left[\frac{\partial P_1(V, \theta)}{\partial \theta} \right] \quad \text{e} \quad N_1 = \left[\frac{\partial P_1(V, \theta)}{\partial V} \cdot V \right]$$

1.4. Gradiente Reduzido

Como já citado em 3.5., Dommel-Tinney consideram como variáveis de controle:

- as magnitudes das tensões nas barras PV;
- a potência ativa gerada, nas barras onde ela pode ser ajustada;
- a derivação de transformador em - fase e de transformador defasador.

A seguir, são deduzidas as componentes do gradiente para estas variáveis de controle. Dommel-Tinney se baseiam em dois tipos de função objetivo:

$$f_1 = \sum K_1(P_{G1}) + \sum w_j \quad (I.27)$$

$$f_2 = P_1(V, \theta) + \sum w_j \quad (I.28)$$

com $P_1(V, \theta)$ - potência ativa da barra de folga.

I.4.1. Tensão controlada (V_k com $k \in PV$)

Da expressão (3.22), para a função objetivo com penalidades:

$$\frac{\delta f_p}{\delta V_k} = \frac{\partial f_p}{\partial V_k} + \left(\frac{\partial g}{\partial V_k} \right)^T \cdot \underline{\lambda} \quad (I.29)$$

- no caso da função objetivo f_1 :

$$\frac{\delta f_1}{\delta V_k} = \frac{\partial f_1}{\partial V_k} + \left(\frac{\partial g}{\partial V_k} \right)^T \cdot \underline{\lambda} \quad (I.30)$$

Desde que todas as P_G , exceto a da barra 1 (barra de folga), são variáveis independentes:

$$\frac{\partial f_1}{\partial V_k} = \frac{dK_1}{dP_{G1}} \cdot \frac{\partial P_1}{\partial V_k} + \sum \frac{\partial w_j}{\partial V_k}$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial V_k} = \frac{dK_1}{dP_{G1}} \cdot \frac{N_{1k}}{V_k} + \sum \frac{\partial w_j}{\partial V_k}$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta f_1}{\delta V_k} = \frac{dK_1}{dP_{G1}} \cdot \frac{N_{1k}}{V_k} + \left\{ \sum_{m \in K} \lambda_{Pm} \cdot \frac{N_{mk}}{V_k} + \sum_{m \in \alpha} \lambda_{Qm} \cdot \frac{L_{mk}}{V_k} \right\} + \\ + \sum \frac{\partial w_j}{\partial V_k} \end{aligned} \quad (I.31)$$

- no caso da função objetivo f_2 :

$$\frac{\delta f_2}{\delta v_k} = \frac{\partial f_2}{\partial v_k} + \left(\frac{\partial g}{\partial v_k} \right)^T \cdot \underline{\lambda} \quad (I.32)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial v_k} = \frac{\partial p_1}{\partial v_k} + \sum \frac{\partial w_j}{\partial v_k}$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial v_k} = \frac{N_{1k}}{v_k} + \sum \frac{\partial w_j}{\partial v_k}$$

$$\frac{\delta f_2}{\delta v_k} = \frac{N_{1k}}{v_k} + \sum_{m \in K} \lambda_{pm} \cdot \frac{N_{mk}}{v_k} + \sum_{m \in \alpha} \lambda_{qm} \cdot \frac{L_{mk}}{v_k} + \sum \frac{\partial w_j}{\partial v_k} \quad (I.33)$$

- sintetizando:

$$\frac{\delta f_p}{\delta v_k} = \frac{1}{v_k} \left[z \cdot N_{1k} + \sum_{m \in K} \lambda_{pm} \cdot N_{mk} + \sum_{m \in \alpha} \lambda_{qm} \cdot L_{mk} \right] + \sum \frac{\partial w_j}{\partial v_k} \quad (I.34)$$

$$z = \begin{cases} \frac{dk_1}{dp_{G1}} & - \text{no caso da função } f_1 \\ 1 & - \text{no caso da função } f_2 \end{cases}$$

K - conjunto das barras vizinhas à barra k , incluindo ela própria.

α - conjunto das barras PQ vizinhas à barra k .

I.4.2. Potência ativa gerada

Da expressão (3.22), para a função objetivo com penalidades:

$$\frac{\delta f_P}{\delta P_{Gi}} = \frac{\partial f_P}{\partial P_{Gi}} + \left(\frac{\partial \underline{g}}{\partial P_{Gi}} \right)^T \cdot \underline{\lambda} \quad (I.35)$$

Lembrando que uma das equações que compõem o vetor $\underline{g}$, está relacionada com a potência P_{Gi} :

$$P_i(V, \theta) - P_{Gi} + P_{Li} = 0 \quad p/i \in (PQ \cup PV)$$

sendo

P_i - potência ativa calculada;

P_{Li} - potência ativa consumida (carga);

obtém-se:

$$\frac{\partial q}{\partial P_{Gi}} = \begin{cases} 0 & ; \text{ se } i \text{ é a barra de folga (barra 1)} \\ -1 & ; \text{ em caso contrário} \end{cases}$$

$$\frac{\delta f_p}{\delta P_{GSL}} = \frac{dK_1}{dP_{G1}} + \sum \frac{\partial w_j}{\partial P_{G1}}$$

(I.36)

$$\frac{\delta f_p}{\delta P_{Gi}} = \frac{dK_1}{dP_{G1}} - \lambda_{P1} + \sum \frac{\partial w_j}{\partial P_{Gi}}$$

I.4.3. Tap de transformador

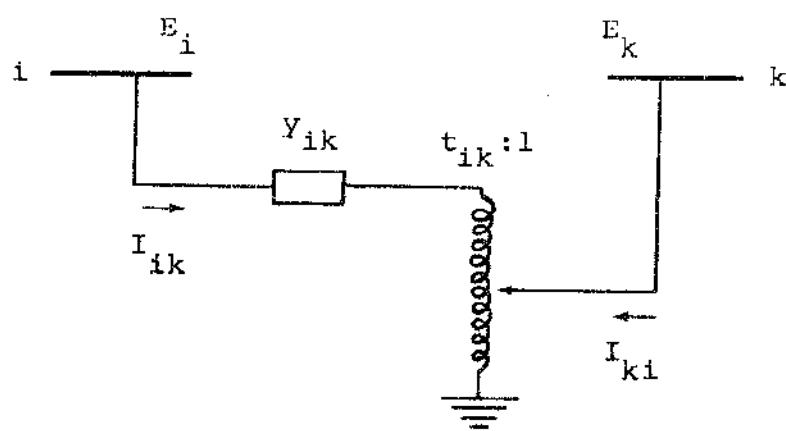


Fig. I.4 - Representação do transformador

$$y_{ik} = g_{ik} + j b_{ik}$$

$$g_{ik} = r_{ik} / (r_{ik}^2 + x_{ik}^2)$$

$$b_{ik} = -x_{ik} / (r_{ik}^2 + x_{ik}^2)$$

(I.37)

r_{ik} - resistência série

x_{ik} - reatância série

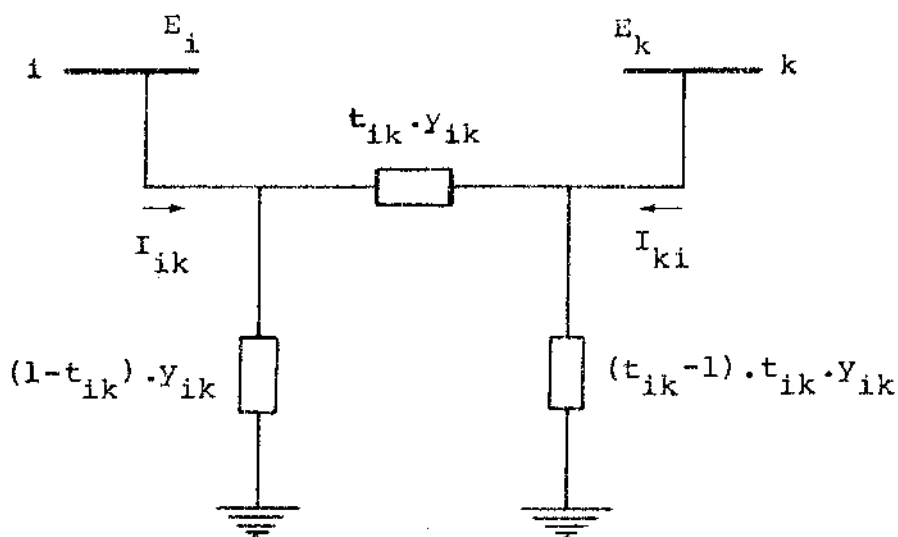


Fig. I. 5 - Circuito π equivalente

Da Fig. I.5:

$$I_{ik} = (1 - t_{ik}) y_{ik} E_i + t_{ik} y_{ik} (E_i - E_k)$$

$$I_{ik} = y_{ik} E_i - \cancel{t_{ik} y_{ik} E_i} + \cancel{t_{ik} y_{ik} E_i} - t_{ik} y_{ik} E_k$$

$$I_{ik} = y_{ik} E_i - t_{ik} y_{ik} E_k \quad (I.38)$$

com

$$E_i = V_i e^{j\theta_i} \quad \text{e} \quad E_k = V_k e^{j\theta_k}$$

Entretanto:

$$S_{ik} = P_{ik} + j Q_{ik} = E_i \cdot I_{ik}^* \quad (\text{I.39})$$

Substituindo (I.38) em (I.39):

$$S_{ik} = E_i y_{ik}^* E_i^* - E_i t_{ik} y_{ik}^* E_k^*$$

$$S_{ik} = V_i^2 y_{ik}^* - V_i V_k t_{ik} y_{ik}^* e^{j\theta_{ik}}$$

$$S_{ik} = V_i^2 g_{ik} - j V_i^2 b_{ik} - V_i V_k t_{ik} e^{j\theta_{ik}} (g_{ik} - j b_{ik})$$

donde

$$P_{ik} = g_{ik} V_i^2 - t_{ik} (V_i V_k g_{ik} \cos\theta_{ik} + V_i V_k b_{ik} \sin\theta_{ik}) \quad (\text{I.40})$$

$$Q_{ik} = -b_{ik} V_i^2 + t_{ik} (V_i V_k b_{ik} \cos\theta_{ik} - V_i V_k g_{ik} \sin\theta_{ik})$$

$$\theta_{ik} = \theta_i - \theta_k$$

De modo análogo:

$$P_{ki} = t_{ik}^2 g_{ik} V_k^2 - t_{ik} (V_k V_i g_{ik} \cos\theta_{ki} + V_k V_i b_{ik} \sin\theta_{ki}) \quad (\text{I.41})$$

$$Q_{ki} = -t_{ik}^2 b_{ik} V_k^2 + t_{ik} (V_k V_i b_{ik} \cos\theta_{ki} - V_k V_i g_{ik} \sin\theta_{ki})$$

Com relação à variável de controle t_{ik} , da equação 3.22 obtém-se:

$$\frac{\delta f}{\delta t_{ik}} = \frac{\partial f}{\partial t_{ik}} + \left(\frac{\partial g}{\partial t_{ik}} \right)^T \cdot \lambda \quad (\text{I.42})$$

$$\frac{\partial \underline{q}}{\partial t_{ik}} = \begin{vmatrix} \vdots \\ \frac{\partial P_i}{\partial t_{ik}} \\ \vdots \\ \frac{\partial P_k}{\partial t_{ik}} \\ \vdots \\ \frac{\partial Q_i}{\partial t_{ik}} \\ \vdots \\ \frac{\partial Q_k}{\partial t_{ik}} \end{vmatrix}$$

Lembrando que

$$P_i = \sum_{l \in \Omega} P_{il}$$

$$P_k = \sum_{m \in \Omega} P_{km}$$

(I.43)

$$Q_i = \sum_{l \in \Omega} Q_{il}$$

$$Q_k = \sum_{m \in \Omega} Q_{km}$$

P_i , Q_i , P_k e Q_k são dependentes de t_{ik} somente quando $l = k$ e $m = i$.

Assim:

$$\frac{\partial P_i}{\partial t_{ik}} = \frac{\partial P_{ik}}{\partial t_{ik}}$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial t_{ik}} = \frac{\partial P_{ki}}{\partial t_{ik}}$$

(I.44)

$$\frac{\partial Q_i}{\partial t_{ik}} = \frac{\partial Q_{ik}}{\partial t_{ik}}$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial t_{ik}} = \frac{\partial Q_{ki}}{\partial t_{ik}}$$

Aplicando (I.44) em (I.40) e (I.41), resulta:

$$\frac{\partial P_i}{\partial t_{ik}} = -V_i V_k (g_{ik} \cos \theta_{ik} + b_{ik} \sin \theta_{ik})$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial t_{ik}} = 2 t_{ik} g_{ik} V_k^2 - V_k V_i (g_{ik} \cos \theta_{ki} + b_{ik} \sin \theta_{ki})$$

(I.45)

$$\frac{\partial Q_i}{\partial t_{ik}} = V_i V_k (b_{ik} \cos \theta_{ik} - g_{ik} \sin \theta_{ik})$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial t_{ik}} = -2 t_{ik} b_{ik} V_k^2 + V_k V_i (b_{ik} \cos \theta_{ki} - g_{ik} \sin \theta_{ki})$$

Dos elementos que constituem a matriz Jacobiana, tem-se:

$$H_{ik} = V_i V_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik})$$

$$H_{ki} = V_k V_i (G_{ik} \sin \theta_{ki} - B_{ik} \cos \theta_{ki})$$

(I.46)

$$N_{ik} = V_i V_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik})$$

$$N_{ki} = V_k V_i (G_{ik} \cos \theta_{ki} + B_{ik} \sin \theta_{ki})$$

com

$$G_{ik} = -t_{ik} \cdot g_{ik} \quad \text{e} \quad B_{ik} = -t_{ik} \cdot b_{ik}$$

Fazendo um confronto de (I.46) com (I.45):

$$\frac{\partial P_i}{\partial t_{ik}} = \frac{N_{ik}}{t_{ik}}$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial t_{ik}} = \frac{N_{ki}}{t_{ik}} + 2 t_{ik} g_{ik} v_k^2$$

(I.47)

$$\frac{\partial Q_i}{\partial t_{ik}} = \frac{H_{ik}}{t_{ik}}$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial t_{ik}} = \frac{H_{ki}}{t_{ik}} - 2 t_{ik} b_{ik} v_k^2$$

Desta forma:

$$\frac{\delta f}{\delta t_{ik}} = \frac{\partial f}{\partial t_{ik}} + \frac{1}{t_{ik}} \left(N_{ik} \lambda_{Pi} + N_{ki} \lambda_{Pk} + H_{ik} \lambda_{Qi} + H_{ki} \lambda_{Qk} \right) +$$

$$+ 2 v_k^2 (B_{ik} \lambda_{Qk} - G_{ik} \lambda_{PQ}) \quad \text{(I.48)}$$

Aplicando-se (I.48) às funções (I.27) e (I.28), chega-se à expressão (3.32).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- |1| - H.W. Dommel e W.F. Tinney, "Optimal Power Flow Solutions", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Outubro 1968, vol. PAS-87, nº 10, págs. 1866 a 1876.

- |2| - I. Hano, Y. Tamura, S. Narita e K. Matsumoto, "Real Time Control of System Voltage and Reactive Power", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Outubro 1969, vol. PAS-88, nº 10, págs. 1544 a 1559.

- |3| - A. Kuppurajulu e K. Raman Nayar, "Minimization of Reactive - Power Installation in a Power System", Proceedings of the IEE, Maio 1972, vol. 119, nº 5, págs. 557 a 563.

- |4| - C.A. Murari, A.V. Garcia e A. Monticelli, "Fluxo de Carga Ótimo e Minimização de Perdas", Relatório nº 1 do Convênio CEPEL/UNICAMP sobre Controle de Reativos, Julho 1978.

- |5| - A.B. De Oliveira, "Controle Tensão - Potência Reativa na Operação de Sistemas de Potência", Tese de Mestrado apresentada na UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, Janeiro 1977.

- |6| - J.G. Siroux, J. Pouget e A. Merlin, "The Economic Load Dispatch - State of the Problem and Developments at Electricité De France", Proceedings of the Symposium on Real-Time Control of Electric Power Systems sob o título: Real-Time Control of Electric Power Systems, Elsevier Publishing Company, 1972, págs. 103 a 113.

- |7| - L.K. Kirchmayer, "Economic Operation of Power Systems", John Wiley and Sons, Inc., New York, N.Y. (1958).

- [8] - H.H. Happ, "Optimal Power Dispatch - A Comprehensive Survey", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Maio/Junho 1977, vol. PAS-96, págs. 841 a 854.
- [9] - Tomas E. DyLiacco, "Real-Time Computer Control of Power Systems", Proceedings of the IEEE, Julho 1974, vol. 62, nº 7, págs. 884 a 891.
- [10] - Tomas E. DyLiacco, "The Adaptive Reability Control System", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Maio 1967, vol. PAS-86, nº 5, págs. 517 a 531.
- [11] - L.P. Hajdu e R. Podmore, "Security Enhancement for Power Systems", 'System Engineering for Power: Status and Prospects', ERDA & EPRI Conf., Henniker, 1975.
- [12] - J.L. Marinho, O. Alsac e B. Stott, "Funções de Monitoração e Controle em Tempo Real de Sistemas Elétricos de Potência", notas de curso: Real-Time Control Calculations, Setembro de 1978, IEEE TELECOM, Rio de Janeiro.
- [13] - W.F. Tinney e C.E. Hart, "Power Flow Solution by Newton's Method", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Novembro 1967, vol. PAS-86, págs. 1449 a 1460.
- [14] - J. Peschon, D.S. Piercy, W.F. Tinney, O.J. Tveit e M. Cuēnođ, "Optimum Control of Reactive Power Flow", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Janeiro 1968, vol. PAS-87, págs. 40 a 48.
- [15] - O.I. Elgerd, "Electric Energy Systems Theory: An Introduction", McGraw-Hill, Inc., New York, N.Y. (1971).
- [16] - M. Aoki, "Introduction to Optimization Techniques", The Macmillan Company, New York, N.Y. (1971).

- [17] - G.W. Stagg e A.H. El-Abiad, "Computer Methods in Power System Analysis", McGraw-Hill Kogakusha, Ltd., Tokyo.
- [18] - David G. Luenberger, "Introduction to Linear and Nonlinear Programming", Addison-Wesley Publishing Company, U.S.A. (1973).
- [19] - J.B. Ward e H.W. Hale, "Digital Computer Solution of Power - Flow Problems", AIEE Transactions, Junho 1956, vol. PAS-75, págs. 398 a 404.
- [20] - L.L. Freris e A.M. Sasson, "Investigation of the load-flow problem", Proceedings of the IEE, Outubro 1968, vol. 115, nº 10, págs. 1459 a 1470.