

# DESPACHO DE REATIVOS EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO UM MODELO IMPLICITAMENTE ACOPLADO E TÉCNICAS DE PROGRAMAÇÃO NÃO LINEAR

Celia Regina Nugoli Estevam<sup>1</sup>; Giuliano Pierre Estevam<sup>2</sup>; José Roberto Sanches Mantovani<sup>3</sup>

## Resumo

Este trabalho propõe um algoritmo baseado na técnica de otimização de pontos interiores para resolver o despacho ótimo de reativos em sistemas de energia elétrica que é um problema de programação não linear de grande porte, com uma função objetivo que reflete os aspectos operacionais do sistema. Adotou-se uma topologia previamente definida para as restrições, na qual se referem ao atendimento das demandas ativa e reativa, a qualidade do fornecimento de energia e manter as condições de operações seguras e confiáveis. O problema Lagrangeano é formulado considerando as restrições de desigualdade através do método das barreiras logarítmicas e o sistema de equações não linear, procedente da aplicação das condições de KKT (“Karush-Kuhn-Tucker”), e resolvido através do método de Newton, em que se considera o despacho implícito entre os subproblemas ativo e reativo através das equações do fluxo de carga CRIC (“Constrained Reactive Implicit Coupling”). Apresentam-se resultados para um pequeno sistema teste de três barras e o sistema IEEE30.

**Palavras-chave** - Algoritmo de Pontos Interiores, Desacoplamento Implícito Potências Ativa e Reativa, Equações do Fluxo de carga CRIC.

## Abstract

This work proposes an algorithm based on interior point optimization techniques to solve the reactive optimal dispatch in electric energy systems, which is a robust non linear programming problem, with an objective function incorporating the operational system aspects. It has been adopted a predefined topology for the constraints, referred to the active and reactive demand providing, the quality of energy providing and maintaining the operation condition in a secure and reliable form. The lagrangian problem is formulated considering the inequality constraints using the logarithmic barriers-methods and the non linear equation system, derived from the KKT (“Karush-Kuhn-Tucker”) conditions. It is solved using the Newton method considering the implicit dispatch with the active and reactive, subproblems, and the CRIC (“Constrained Reactive Implicit Coupling”) load flow equations. Results for a short test system of three bus and a IEEE30 system test are presented.

**Keywords** - Interior Point Algorithm, Implicit Decoupling Active and Reactive Powers, Load Flow Equations of CRIC.

## 1 INTRODUÇÃO

O despacho de reativos é um subproblema do fluxo de potência ótimo, constituindo-se uma importante etapa dentro da solução de planejamento de reativos em sistemas de energia elétrica. A solução do despacho de reativos consiste em determinar os ajustes dos dispositivos de controle das magnitudes das tensões existentes no sistema (bancos de capacitores e reatores, “taps” de

<sup>1</sup> Celia Regina Nugoli Estevam - Fatec Araçatuba. E-mail: celia.nugoli@gmail.com

<sup>2</sup> Giuliano Pierre Estevam - Fatec Araçatuba. E-mail: giulianoestevam@gmail.com

<sup>3</sup> José Roberto Sanches Mantovani - Unesp Ilha Solteira. E-mail: mant@dee.feis.unesp.br

transformadores, capacidade própria de geração de reativos de geradores, compensadores síncronos e estáticos), com vista a obter um perfil pré-determinado das magnitudes das tensões em todas as barras do sistema.

Trata-se de um problema de programação não linear de grande porte em que a função objetivo pode assumir várias componentes, sendo as mais comuns a minimização de perdas do sistema de transmissão, redução das infactibilidades das magnitudes das tensões; minimização das necessidades reativas para o sistema. As restrições consideradas no problema, adotando-se uma topologia previamente definida para o sistema de geração e transmissão, referem-se ao atendimento das demandas ativas e reativas, qualidade de serviço prestado, mantendo-se as magnitudes das tensões dentro de limites considerados satisfatórios, restrições físicas e operacionais dos equipamentos instalados no sistema, tais como limites térmicos de linha de transmissão, limites nas capacidades de geradores, compensadores síncronos e estáticos.

Neste artigo considera-se para resolver o problema do despacho ótimo de reativos um método de otimização clássico de programação não linear, em que as restrições de desigualdades são consideradas através do método das barreiras logarítmicas, semelhante ao proposto por Granville (1994), devendo-se adotar soluções para contornar problemas relativos à natureza não linear em redes que estão sob severas condições de operação, tornando o subproblema reativo excessivamente mal comportado, o que por sua vez dificulta a solução numérica do sistema de equações não lineares resultantes da aplicação do método de Newton e das condições de otimalidade de primeira ordem, o que podem causar sérios problemas de instabilidade numérica.

O principal enfoque deste artigo é o desacoplamento  $P-\theta$  e  $Q-V$  na solução do problema. A metodologia utilizada para resolver o despacho de reativos baseia-se na aplicação do método das barreiras logarítmicas e no desacoplamento implícito potência ativa ( $P$ ) – potência reativa ( $Q$ ) proposto através do modelo de fluxo de carga CRIC por Carpentier (1986), Mantovani, (1987), Saavedra (1988).

As versão desacopladas “evitam” inverter uma matriz de ordem elevada a cada iteração e o desacoplamento possibilita a adoção de um esquema de resolução segundo o qual os subproblemas  $P\theta$  e  $QV$  são resolvidos alternadamente: na solução do subproblema  $P\theta$  são utilizados os valores atualizados de  $V$ , na resolução do subproblema  $QV$  são utilizados os valores atualizados de  $\theta$ .

O método de Newton e suas versões desacopladas são os métodos de iteração mais sofisticados, pois para a resolução do problema de fluxo de potência, na maioria dos casos eles não oferecem riscos de divergência e como regra geral a divergência por eles proporcionada é muito mais rápida de que em

outros métodos. São apresentados resultados para um sistema teste hipotético de três barras e o sistema teste IEEE30.

## 2 FORMULAÇÃO GERAL DO PROBLEMA DE DESPACHO DE REATIVOS

O despacho de reativos é um caso particular de um problema muito mais genérico, o fluxo de potência ótimo mostrado por Dommel e Tinney (1968), Iba (1988), Lebow et al (1984), Sum et al (1984), que consiste em determinar um ponto de operação para o sistema que otimiza uma função objetivo sujeita a um conjunto de restrições de operação e limitações físicas do sistema. Que pode ser formulado como:

$$\text{Min}W = \sum_{i \in I} (Cl_i y1_i + Cl_i y2_i) \quad (1.a)$$

*s.a.*

$$P^{sp} - P(\theta, V) = 0 \quad (1.b)$$

$$QG_i - QC_i - Q_i(\theta, V) + y1_i - y2_i = 0 \quad i \in I \quad (1.c)$$

$$Q_k^{sp} - Q_k(\theta, V) = 0 \quad k \in \{NB - I\} \quad (1.d)$$

$$QG_i^{\min} \leq QG_i \leq QG_i^{\max} \quad i \in I \quad (1.e)$$

$$\underline{V}^{\min} \leq \underline{V} \leq \underline{V}^{\max} \quad (1.f)$$

$$0 \leq y1_i \leq y1_i^{\max} \quad i \in I \quad (1.g)$$

$$0 \leq y2_i \leq y2_i^{\max} \quad i \in I \quad (1.h)$$

Em que:

I: Conjunto de barras (nós elétricos) que possuem dispositivos de controle e compensação de reativos;

$y1_i, y2_i$ : injeções reativas fictícias, dos tipos capacitiva e indutiva;

$V, \theta$ : Magnitudes e ângulos das tensões em todas as barras do sistema;

$\underline{V}^{\min}, \underline{V}^{\max}$ : Limites inferior e superior para as magnitudes das tensões em todas as barras do sistema;

$y1_i^{\max}, y2_i^{\max}$ : Limites inferior e superior para as injeções reativas fictícias capacitivas e indutivas mínimas e máximas;

$QG^{\min}, QG^{\max}$ : Limites inferior e superior de geração de fontes reativa contínuas (compensadores síncronos ou estáticos, geradores);

$Cl_i$ : custo;

NB: número de barras.

Os conjuntos de equações (1.b) - (1.e) são as equações estáticas do fluxo de carga, que representam o balanço de potências ativa e reativa do sistema e

relacionam as condições de operação da rede elétrica, com capacidade de geração e o atendimento das demandas ativas (P) e reativas (Q).que são dadas por:

$$PG_k - PL_k - P_k(\theta, V) = 0 \quad (2)$$

$$QG_k - QL_k - Q_k(\theta, V) = 0 \quad (3)$$

A solução do problema (1.b) - (1.h) fornece informações, caso existam, das regiões com falta de suporte de reativos, através dos valores das injeções reativas fictícias  $y_1, y_2$ , e se a razão de uma possível solução inviável do problema for a falta de suporte reativo, essas injeções permitirão a obtenção de uma solução. Outro aspecto interessante na solução do despacho de reativos refere-se às barras onde alocar variáveis de folga ( $y_1, y_2, i \in I$ ) - elas podem ser alocadas em todas as barras do sistema ou apenas em um conjunto mais crítico de barras sob o aspecto reativo.

### 3 TÉCNICA DE SOLUÇÃO PARA O PROBLEMA DE DESPACHO DE REATIVOS

Neste trabalho a solução proposta para o problema de despacho ótimo de reativos, é abordada através do métodos das barreiras logarítmicas e do método de Newton para equações não lineares resultante da aplicação das condições de otimalidade de primeira ordem de KKT (“Karush-Kuhn-Tucker”). Dessa forma considera-se o problema (1.a) - (1.h), em que as restrições de desigualdade são transformadas em restrições de igualdade através do uso de variáveis de folga ou de excesso, obtendo-se o seguinte problema equivalente:

$$\text{Min } W = \sum_{i \in I} (C1_i y1_i + C1_i y2_i) \quad (4.a)$$

s.a.

$$P^{sp} - P(\theta, V) = 0 \quad (4.b)$$

$$QG_i - QC_i - Q_i(\theta, V) + y1_i - y2_i = 0 \quad i \in I \quad (4.c)$$

$$Q_k^{sp} - Q_k(\theta, V) = 0 \quad k \in \{\text{NB-I}\} \quad (4.d)$$

$$QG_i - VQ1_i = QG_i^{\min} \quad i \in I \quad (4.e)$$

$$QG_i + VQ2_i = QG_i^{\max} \quad i \in I \quad (4.f)$$

$$\underline{V} - \underline{VV}1 = \underline{V}^{\min} \quad (4.g)$$

$$\underline{V} + \underline{VV}2 = \underline{V}^{\max} \quad (4.h)$$

$$y1_i + Vy1_i = y1_i^{\max} \quad i \in I \quad (4.i)$$

$$y2_i + Vy2_i = y2_i^{m\acute{a}x} \quad i \in I \quad (4.j)$$

$$VQ1_i \geq 0, VQ2_i \geq 0, Vy1_i \geq 0, Vy2_i \geq 0 \quad i \in I \quad (4.k)$$

$$\underline{VV1} \geq 0; \underline{VV2} \geq 0; y1_i \geq 0, y2_i \geq 0 \quad i \in I \quad (4.l)$$

Em que:

$\underline{VV1}$ ,  $\underline{VV2}$ : variáveis de excesso e de folga das magnitudes de tensão em todas as barras do sistema;

$VQ1_i$ : variáveis de excesso referentes às potências reativas geradas, injeções reativas fictícias do tipo capacitivas e indutivas, nas barras de tensão controlada;

$VQ2_i$ ,  $Vy1_i$ ,  $Vy2_i$ : idem, variáveis de folga.

Para solução do problema, adotou-se neste trabalho o método de Segunda ordem de Newton mostrado por Bazaraa et al e Sum et al (1984). Transformando este problema num problema com restrições de igualdade usando a técnica da penalidade logarítmica – ponto interior, formula-se o problema Lagrangeano mostrado por Bazaraa et al, que incorpora as restrições de igualdade à função objetivo através dos multiplicadores de Lagrange. A partir da expansão em série de Taylor do Lagrangeano, geram-se as direções de busca nos espaços das variáveis primais e duais, considerando-se a condição de otimalidade de 1ª ordem para o Lagrangeano (Derivada primeira do Lagrangeano com relação às variáveis envolvidas igual a zero). Efetuando as devidas manipulações algébricas ao Lagrangeano e considerando-se as condições de otimalidade de primeira ordem, chega-se ao seguinte sistema de equações que deve ser resolvido de forma iterativa até a convergência:

$H1 + \mu V[VV1]^{-2} + \mu V[VV2]^{-2}$	H2				J1	J2	$\Delta V$	$-\pi P^i \frac{\partial P}{\partial V} - \pi Q^i \frac{\partial Q}{\partial V} + \frac{\mu V}{VV1} - \frac{\mu V}{VV2}$
H3	H4				J3	J4	$\Delta \theta$	$-\pi P^i \frac{\partial P}{\partial \theta} - \pi Q^i \frac{\partial Q}{\partial \theta}$
		$\frac{\mu Q}{y1^2} + \frac{\mu Q}{Vy1^2}$					$\Delta y1$	$-C1 + \frac{\mu Q}{y1} + \pi Q_i - \frac{\mu Q}{Vy1_i}$
			$\frac{\mu Q}{y2^2} + \frac{\mu Q}{Vy2^2}$				$\Delta y2$	$-C1 + \frac{\mu Q}{y2} + \pi Q_i - \frac{\mu Q}{Vy2_i}$
				$\frac{\mu Q}{VQ1^2} + \frac{\mu Q}{VQ2^2}$			$\Delta QG$	$\pi Q + \frac{\mu Q}{VQ1_i} - \frac{\mu Q}{VQ2_i}$
J1	J3						$\Delta \pi P$	$P^{esp} - P(\theta, V)$
J2	J4	-1	1	-1			$\Delta \pi Q$	$QG_i - QC_i - Q(\theta, V) + y1_i + y2_i$

$\cdot =$  (5)

#### 4 FLUXO DE CARGA ÓTIMO DESACOPLADO UTILIZANDO AS EQUAÇÕES BÁSICAS DO CRIC

O sistema matricial (5) reúne as vantagens de ser esparso e apresentar as sensibilidades entre as potências ativas e reativas e todas as variáveis do sistema. O inconveniente desta formulação é apresentar um grande número de submatrizes de acoplamento entre os problemas ativo e reativo, o que dificulta a solução do problema. Neste trabalho, buscando um algorítmico mais eficiente sob os aspectos computacionais para a solução do problema de despacho de reativos, propõe-se a solução do problema, através do desacoplamento potência ativa (P) – ângulo das tensões ( $\theta$ ) e potência reativa (Q) – magnitude das tensões (V).

A idéia do desacoplamento surge das características inerentes de um sistema elétrico prático operando em regime permanente. Nele se verifica a forte interdependência entre as potências ativas e os ângulos das tensões das barras e entre as potências reativas e as magnitudes dessas tensões. Esse fenômeno é conhecido como acoplamento P- $\theta$  e acoplamento Q-V respectivamente. Por outro lado, as sensibilidades entre potência ativa vs. magnitude de tensão e potência reativa vs. ângulo de tensão, são comparativamente pequenas as anteriores. Isto em geral se verifica em redes de extra-alta-tensão (maior que 230 KV) e ultra-alta-tensão (maior que 750 KV), considerando-se estas condições, o conjunto de equações (5), está operando com dois conjuntos de equações praticamente independentes, o que sugere um tratamento individual de resolução para cada um deles. Dessa forma, é possível executar o desacoplamento P $\theta$ -QV, transformando o sistema matricial (5), nos subproblemas ativo (P- $\theta$ ) e reativo (Q-v), apresentados a seguir, desprezando-se as submatrizes de acoplamento. O tratamento separado destes subproblemas não altera a solução final, já que o problema a resolver continuará o mesmo, mudando apenas a trajetória do processo de convergência.

$$\begin{array}{|c|c|} \hline H4 & J3 \\ \hline J3 & \\ \hline \end{array} \cdot \begin{array}{|c|} \hline \Delta\theta \\ \hline \Delta\pi P \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline -\pi P^i \frac{\partial P}{\partial \theta} \\ \hline P^{esp} - P(\theta, V) \\ \hline \end{array} \quad (6)$$

Subproblema Ativo

$$\begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline H1 + \mu V[VV1]^{-2} & & & & J2 \\ + \mu V[VV2]^{-2} & & & & \\ \hline & \frac{\mu Q}{y1^2} + \frac{\mu Q}{Vy1^2} & & & -1 \\ \hline & & \frac{\mu Q}{y2^2} + \frac{\mu Q}{Vy2^2} & & 1 \\ \hline & & & \frac{\mu Q}{VQ1^2} + \frac{\mu Q}{VQ2^2} & -1 \\ \hline & & & & \\ \hline \end{array} \cdot \begin{array}{|c|} \hline \Delta V \\ \hline \Delta y1 \\ \hline \Delta y2 \\ \hline \Delta QG \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline -\pi P^i \frac{\partial P}{\partial V} - \pi Q^i \frac{\partial Q}{\partial V} + \frac{\mu V}{VV1} - \frac{\mu V}{VV2} \\ \hline -C1 + \frac{\mu Q}{y1_i} + \pi Q_i - \frac{\mu Q}{Vy1_i} \\ \hline -C1 + \frac{\mu Q}{y2_i} + \pi Q_i - \frac{\mu Q}{Vy2_i} \\ \hline \pi Q + \frac{\mu Q}{VQ1_i} - \frac{\mu Q}{VQ2_i} \\ \hline QG_i - QC_i - Q(\theta, V) + y1_i + y2_i \\ \hline \end{array} \quad (7)$$

J2	-1	1	-1		$\Delta\pi Q$	
----	----	---	----	--	---------------	--

Subproblema Reativo

Sendo que:

H4 e H1: são proporções da matriz H correspondente as variáveis associadas a potência ativa e reativa, respectivamente;

J3 e J2: são jacobianos do balanço de equações de potência ativa/reativa correspondente as variáveis de potência ativa/reativa

As equações necessárias para formar a submatriz relacionada com as equações de balanço de potência ativa e as variáveis envolvidas, são as mesmas desenvolvidas para a versão acoplada do algoritmo.

O objetivo deste trabalho é utilizar no subproblema reativo as equações do fluxo de carga CRIC, desenvolvido por Carpentier (1986) que se fundamenta em dois critérios, um de natureza teórica e o outro prática:

- O primeiro consiste em preservar as injeções ativas durante a iteração reativa (os ângulos das tensões se combinam de forma a manter constante as injeções de potência ativa);
- O segundo leva em conta que quando os módulos das tensões são alterados, uma maneira de manter constante a injeção de potência ativa, é manter constante o fluxo de potência ativa através de cada bipolo do sistema.

A aplicação dos conceitos anteriormente descritos a um bipolo qualquer do sistema, leva a uma equação de injeção de potência reativa na barra  $k$  dada por:

$$Q_k = N_k V_k^2 - \sum_{m \in \Omega_k} \xi_{km} V_k V_m [1 - \sin^2(\theta_{km} - \alpha_{km})]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

e as equações para formação do subproblema reativo devem ser totalmente rescritas.

A equação (8) é função de  $V_k$  e  $V_m$  mantendo  $P_{km}$  constante. Esta expressão permite estabelecer um jacobiano reativo – LCRIC, válido para cada iteração Q-V. Desta forma os elementos da submatriz J3 passam a ser dados pelo seguinte conjunto de equações:

Elementos da diagonal:

$$2N_k V_k - \sum_{m \in \Omega_k} \xi_{km} \left[ \frac{V_m + 2V_k \beta_{km} \sin(\theta_{km} - \alpha_{km})}{\cos(\theta_{km} - \alpha_{km})} \right] \quad (9)$$

Elementos fora da diagonal:

$$\frac{-\xi_{km}V_k}{\cos(\theta_{km} - \alpha_{km})} \quad (10)$$

Os elementos da submatriz H1 passam a ser dados por:

Elementos da diagonal:

$$2N_k - \sum_{m \in \Omega_k} \xi_{km} \left[ \frac{2\beta_{km} \text{sen}(\theta_{km} - \alpha_{km})}{\cos(\theta_{km} - \alpha_{km})} \right] \quad (11)$$

Elementos fora da diagonal:

$$\frac{-\xi_{km}}{\cos(\theta_{km} - \alpha_{km})} \quad (12)$$

## 5 DETALHES DA IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

Para a obtenção dos resultados dos testes, foram elaborados programas computacionais em FORTRAN para o cálculo de fluxo de potência ótimo reativo utilizando a versão desacoplada do algoritmo primal-dual de potência ativa e reativa utilizando-se o modelo CRIC. Para tratar da esparsidade da matriz, foi utilizado o conjunto de subrotinas MA28 mostrado por Duff (1977).

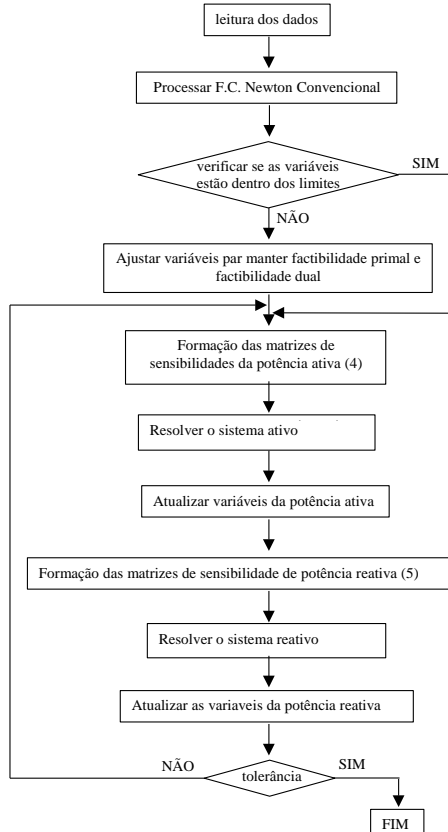


Fig.5.1: Diagrama de Blocos da versão Desacoplada



O critério de convergência adotado foi o cálculo do parâmetro de barreira com base no menor gap de dualidade entre a solução nos espaços das variáveis primais e duais. Desta maneira o parâmetro de barreira em cada iteração principal do método de Newton é dado genericamente pela seguinte equação:

$$\mu = \frac{gap^*}{4(n+m)} \quad (13)$$

em que  $gap^*$  é o gap de dualidade, dado por:

$$gap^* = \sum_{i=1}^{NB} (VV1_i \cdot \pi V1_i - VV2_i \cdot \pi V2_i) + \sum_{i \in I} (VQ1_i \cdot \pi QG1_i - VQ2_i \cdot \pi QG2_i) \quad (14)$$

em que  $n$  é o número de variáveis de folga primais e  $m$  é o número de variáveis duais.

## 6 TESTES E RESULTADOS

Foram realizados testes com o sistema de três barras e três linhas de transmissão, cujos dados são fornecidos nas tabelas 1 e 2. Também foram realizado testes com o sistema IEEE30 que é constituído de 30 barras, 37 linhas de transmissão e 4 transformadores com mudança automática de “tap” sob a carga, sendo seus dados apresentados na tabela 3.

Os custos utilizados na simulação ( $C1_i, i \in I$ ) foram iguais a 30,0, o parâmetro de barreira inicial  $\mu_Q = \mu_V = 15,0$  e o valor do sigma foi de 0,8 para todos os testes.

Foram considerados dois perfis para a magnitudes das tensões nas barras do sistema teste de 3 barra ( $0,95 \leq V \leq 1,05$ ) e ( $0,97 \leq V \leq 1,03$ ). Para o sistema IEEE30 foram realizados testes considerando-se as magnitudes das tensões  $0,95 \leq V \leq 1,05$  no caso base e simulando contingência: retirada da linha 1-2.

**Tabela 1** - Dados das barras usados nas simulações do sistema teste de 3 barras

barra	tipo	QC(pu)	QG <sup>min</sup>	QG <sup>máx</sup>
1	referência	,000	-0,100	0,100
2	PV	0,550	-0,100	0,100
3	PQ	0,509	-0,100	0,100

Fonte: Elaborada pelos autores

**Tabela 2** - Dados das linhas usados nas simulações do sistema teste de 3 barras

linha	NI	NF	R (Ω)	X(Ω)
1	1	2	5,70	17,37
2	2	3	1,32	3,79
3	1	3		25,60

Fonte: Elaborada pelos autores

**Tabela 3** - Dados das barras usados nas simulações do sistema teste IEEE30

barra	tipo	QC(pu) (pu)	QG <sup>min</sup> (pu)	QG <sup>máx</sup> (pu)
1	referência	,0000	-	0,3000
2	<i>PV</i>	0,2170	-	0,5000
5	<i>PV</i>	0,9420	-	0,4000
8	<i>PV</i>	0,3000	-	0,4000
11	<i>PV</i>	0,000	-	0,2400
13	<i>PV</i>	0,000	-	0,2400

Fonte: Elaborada pelos autores

**Tabela 4** - Contingência retida na linha 1-2

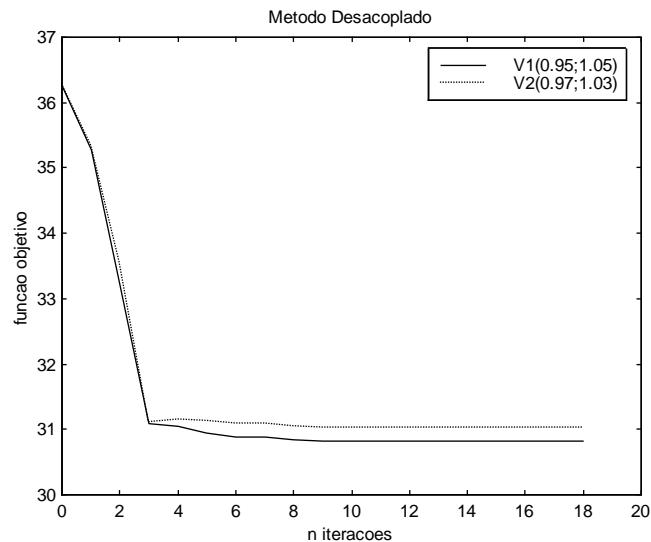
Barra	Y1 (pu)	QGE (pu)
2	0,00000	0,49999
5	0,00000	0,39999
8	0,00000	0,39999
11	0,00000	0,23999
13	0,00000	0,23999

Fonte: Elaborada pelos autores

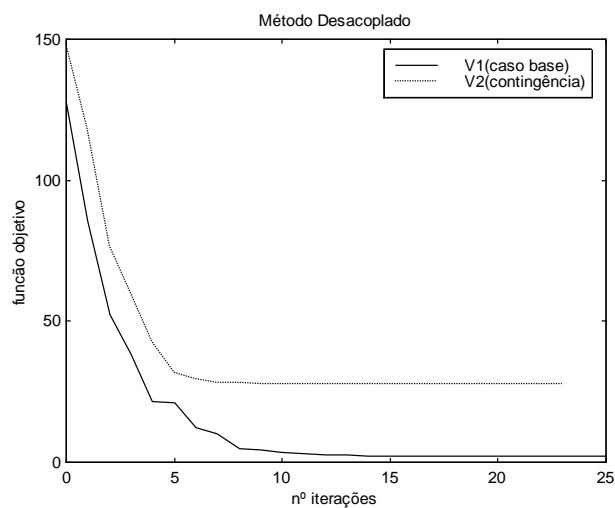
**Tabela 5** - Caso base

Barra	Y1 (pu)	QGE (pu)
1	0,00000	-0,19999
2	0,00000	0,29335
5	0,00000	0,39999
8	0,00000	0,39999
11	0,00000	0,23999
13	0,00000	0,23999

Fonte: Elaborada pelos autores



**Fig.6.1:** Gráfico da versão Desacoplada para o sistema de 3 barras



**Fig.6.2:** Gráfico da versão Desacoplada para o sistema de 30 barras

## 7 CONCLUSÃO

O problema de despacho de reativos tratados neste trabalho é um problema não linear, não convexo, mal condicionado e de difícil solução, o qual tem sido abordado por diversos autores. Apresentou-se um algoritmo computacional baseado no desacoplamento  $P-\theta$ ,  $Q-V$  e nas equações do fluxo de carga CRIC para a solução do problema de despacho ótimo de reativos em Sistemas Elétricos de Potência.

A técnica de otimização utilizada foi um algoritmo de pontos interiores do tipo não linear. Os resultados obtidos são promissores. O desempenho de convergência do algoritmo é dependente dos valores dos parâmetros de barreiras iniciais  $\mu_Q$ ,  $\mu_V$ , da equação utilizada para atualização desses parâmetros e das condições de simulação do sistema (nível de tensão, carga, contingência). Nos testes realizados, os melhores resultados foram encontrados usando equações aproximadas para a correspondente

submatriz da Hessiana que utiliza a derivada segunda das injeções de potência reativa com relação às magnitudes das tensões.

O desempenho do algoritmo apresentado independe de inicializar o despacho de reativos através do método de Newton convencional, conforme o algoritmo proposto neste trabalho, ou inicializar num ponto dual factível e com as variáveis primais dentro de seus limites de definição.

No algoritmo desenvolvido e implementado, permite-se utilizar valores iguais ou diferentes para os parâmetros de barreira relativo às variáveis de tensão ( $\mu V$ ) e potência reativa ( $\mu Q$ ). Nos testes realizados constatou-se que a diferença de comportamento do algoritmo, ao se utilizar valores iguais ou diferentes para esses parâmetros, está no número de iterações necessários para se obter resultados praticamente iguais; ou seja, ao se utilizar o parâmetro de barreira da tensão (cerca de 10% desse valor), o algoritmo converge mais rápido.

A convergência para as injeções de potência ativa e reativa nas barras foram obtidas com excelente precisão,  $\varepsilon = 10^{-6}$  para o sistema teste de 3 barras e  $\varepsilon = 10^{-7}$  para o sistema IEEE30.

## REFERÊNCIAS

BAZARAA, M. S. et al. “**Nonlinear Programming - Theory and Algorithms**”, John Wiley & Sons, Second Edition, May 2006.

CARPENTIER, J.L. “CRIC, a New Active Reactive Decoupling Process in Load Flows, Optimal Power Flow and System Control”, **Proc. IFAC Conference on Power Systems and Power Plan Control**, pp. 65-70, August 1986.

DOMMEL, H.W. & Tinney, W.F. “Optimal Power Flow Solutions”, **IEEE Transactions on PAS**, Vol. PAS-87, n<sup>o</sup> 10, pp. 1866-1876, October 1968.

DUFF, I. S. “MA28-A Set of Fortran Subroutines for Sparse Unsymmetric Linear Equations” **AERE Report R8730**, HMSO London, 1977.

GRANVILLE, S. “Optimal Reactive Dispatch Trought Interior Points Methods ”, **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 9, n<sup>o</sup> 1, pp. 136-146, February, 1994.

IBA, K. “Practical Reactive Power Allocation / Operation Using Sucessive Linear Programming”, **IEEE Transactions on Power Systems**, n<sup>o</sup> 2, pp.558-566, May 1988.

LEBOW, W.M. et al. “Optimization of Reactive Volt-Ampere (VAr) Sources in System Planning”, **Vol. 1: Solution Techniques, Computing Methods and Results**, EL-3279, Vol. 1, Final Report, November 1984.

MANTOVANI, J.R.S. “Planejamento de Reativos em Sistemas de Energia Elétrica: Solução Via Programação Linear Sucessiva Utilizando um Modelo Implicitamente Acoplado, **Tese de Mestrado, Unicamp**, 1987.

SAAVEDRA, O.R. “Cálculo de Fluxo de carga Desacoplado: Modelo de matrizes Constantes Baseado na Filosofia do Acoplamento Implícito”, **Tese de Mestrado, Unicamp**, 1988.

SUM, D.I. et al. “Optimal Power Flow by Newton Approach”, **IEEE Transactions on Power Systems**, n<sup>o</sup> 10, pp. 2854-2880, October 1984.