



GRUPO IV
GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT

DESPACHO ÓTIMO ATIVO E REATIVO COM RESTRIÇÃO NA TRANSMISSÃO

Leandro S. Pereira **Vanusa A. de Sousa*** **Alessandra M. Souza** **Geraldo R. M. da Costa**
PETROBRÁS **EESC-USP** **EESC-USP** **EESC-USP**

RESUMO

Este artigo apresenta um estudo sobre despacho ótimo de potência ativa e reativa AC com restrição na transmissão. O método primal dual barreira logarítmica foi utilizado para resolver o problema. Como resultado temos as injeções de potência ativa e reativa dentro dos limites pré-estabelecidos, a demanda satisfeita e a função objetivo minimizada.

PALAVRAS-CHAVE

Despacho Ótimo Ativo e Reativo. Fluxo de Potência Ótimo. Programação Não Linear. Método Primal-Dual Barreira Logarítmica.

1.0 - INTRODUÇÃO

O problema de fluxo de potência ótimo (FPO) foi proposto no início da década de 60 a partir do problema de despacho econômico (1), desde então as propostas de solução seguem de perto os avanços das técnicas de otimização. Basicamente, o problema de FPO pode ser dividido em despacho ativo, conhecido como despacho econômico, e despacho reativo. O despacho econômico determina a geração ótima de potência ativa ao menor custo, usando como restrições de igualdade as equações linearizadas do fluxo de carga DC e, normalmente, não trata os limites de fluxo na transmissão. O problema de despacho de reativos fixa, a menos da barra *slack*, as variáveis associadas à potência ativa, isto é, as injeções de potência ativa e os defasadores, e determina as variáveis ótimas que minimizam as perdas ativas na transmissão. Neste artigo propomos uma solução para o problema de despacho ótimo de potência ativa e reativa AC com

restrição na transmissão. Este problema é um caso particular do FPO, onde as injeções de potência ativa e os limites de fluxo na transmissão são considerados variáveis do problema, assim como as magnitudes de tensão, ângulos e taps dos transformadores, tendo como função objetivo a minimização das perdas ativas na transmissão. Tratar o limite de fluxo como restrição do problema permite que se evite uma solução esperada, onde as gerações próximas às cargas atinjam seus limites superiores para minimizar as perdas de potência ativa na transmissão.

Desde a década de 80, a reestruturação do setor elétrico vem ganhando muita atenção em todo o mundo. Antes deste período a estrutura organizacional do setor era vertical e monopolizada, ou seja, a geração, a transmissão e a distribuição de energia, eram controladas por uma "autoridade" (2). Com a desregulamentação do setor e o surgimento do ambiente competitivo, as ferramentas de otimização passam a desempenhar um importante papel para as empresas.

No novo modelo do setor elétrico alguns problemas operacionais ainda não foram totalmente resolvidos. Podemos citar, por exemplo, o problema de despacho de potência ativa, isto é, como despachar potência ativa, considerando os limites nas linhas de transmissão, nas injeções de reativo e das tensões. Atualmente, este problema é resolvido utilizando, como ferramenta básica, um programa de fluxo de potência em um processo de tentativas e erros, onde a experiência do operador é fundamental para resolvê-lo. O despacho ótimo de potência ativa e reativa surge, neste contexto, como uma ferramenta de otimização a qual fornece ao operador do sistema o melhor ponto de

* EESC-USP, Avenida Trabalhador São-carlense, 400 - Centro - CEP 13566-590 – São Carlos - SP - BRASIL
Tel.: (016) 273-9366 ramal: 229 - Fax: (016) 273-9372 - E-MAIL: vsousa@sel.eesc.usp.br

operação, otimizando um desempenho da rede.

O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo sobre despacho ótimo de potência ativa e reativa AC com restrição na transmissão utilizando o método primal-dual barreira logarítmica (3).

2.0 - FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O fluxo de potência ótimo pode ser representado matematicamente através de um problema geral de otimização com restrições de igualdade e desigualdade como:

$$\begin{aligned} & \text{Min } f(x) \\ & \text{s.a. } g(x) = 0 \\ & \quad h_l \leq h(x) \leq h_u \\ & \quad l \leq x \leq u \end{aligned} \quad (1)$$

onde :

$x = (V, \theta, t) \in R^n$: vetor das variáveis de estado,

$f(x)$: função objetivo que representa o desempenho do sistema,

$g(x) = 0 \in R^m$: vetor que corresponde às equações do fluxo de potência, onde $m < n$,

$h(x) \in R^p$: vetor que corresponde às restrições funcionais do fluxo de potência,

h_l e h_u : limites inferiores e superiores das restrições funcionais de $h(x)$, respectivamente.

l e u : limites inferiores e superiores das variáveis de x , respectivamente.

O vetor das variáveis de estado x representa as magnitudes de tensão (V), os ângulos (θ) e os taps dos transformadores (t). A função objetivo, $f(x)$, representa as perdas de potência ativa na transmissão. Essa função é não separável e não permite simplificações. As restrições de igualdade $g(x)$ são as equações do fluxo de potência as quais são obtidas impondo-se o princípio da conservação de potência em cada barra da rede. As restrições de desigualdade $h(x)$ representam as restrições funcionais das injeções de potências ativa e reativa nas barras de geração, das injeções de reativo nas barras de controle de reativo e dos fluxos ativos e reativos nas linhas de transmissão.

3.0 MÉTODO PRIMAL-DUAL BARREIRA LOGARÍTMICA

A resolução do problema de fluxo de potência ótimo pelo método Primal-Dual Barreira Logarítmica (PDBL) exige que as restrições de desigualdades se tornem igualdades através da adição de variáveis de folga ou excesso estritamente positivas. Portanto, o problema (1) modificado pode ser apresentado como:

$$\begin{aligned} & \text{Min } f(x) \\ & \text{s.a. } g(x) = 0 \quad (a) \\ & \quad h(x) + s_1 = h_u \quad (b) \\ & \quad h(x) - s_2 = h_l \quad (c) \\ & \quad x + s_3 = u \quad (d) \\ & \quad x - s_4 = l \quad (e) \\ & \quad s_1, s_2, s_3, s_4 > 0 \quad (f) \end{aligned} \quad (2)$$

As variáveis de folga e de excesso são incorporadas à função objetivo através da função barreira logarítmica:

$$\begin{aligned} f_i = & f(x) - \beta \left[\sum_{i=1}^p [\ln(s_{1_i}) + \ln(s_{2_i})] + \right. \\ & \left. - \sum_{j=1}^n [\ln(s_{3_j}) + \ln(s_{4_j})] \right] \end{aligned} \quad (3)$$

onde o parâmetro de barreira β é uma grandeza positiva que tende a zero durante o processo de otimização. Baseado no teorema de Fiacco e McCormick (4), quando β tende a zero, a solução do subproblema, $x(\beta)$ aproxima-se de x^* , a solução de (1). A função Lagrangiana associada ao problema modificado (2) com a função barreira é:

$$\begin{aligned} L = & f(x) - \beta \left[\sum_{i=1}^p [\ln(s_{1_i}) + \ln(s_{2_i})] + \right. \\ & \left. - \sum_{j=1}^n [\ln(s_{3_j}) + \ln(s_{4_j})] \right] - \sum_{y=1}^m \lambda_y g_y(x) + \\ & \sum_{i=1}^p [\lambda_{1_i} (h_i(x) + s_{1_i}) + \lambda_{2_i} (h_i(x) + s_{2_i})] + \\ & \sum_{j=1}^n [\lambda_{3_j} (x_j + s_{3_j}) + \lambda_{4_j} (x_j - s_{4_j})] \end{aligned} \quad (4)$$

onde:

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ são os multiplicadores de Lagrange.

Aplicando as condições de otimalidade na Eq. (4), obtém-se o seguinte sistema de equações:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial x} = & \frac{\partial f(x)}{\partial x} - \beta \left[\frac{\partial}{\partial x} \sum_{i=1}^p [\ln(s_{1_i}) + \ln(s_{2_i})] - \frac{\partial}{\partial x} \sum_{j=1}^n [\ln(s_{3_j}) + \ln(s_{4_j})] \right] - \sum_{y=1}^m \lambda_y \frac{\partial g_y(x)}{\partial x} + \\ & \sum_{i=1}^p [\lambda_{1_i} \frac{\partial}{\partial x} (h_i(x) + s_{1_i}) + \lambda_{2_i} \frac{\partial}{\partial x} (h_i(x) + s_{2_i})] + \\ & \sum_{j=1}^n [\lambda_{3_j} \frac{\partial}{\partial x} (x_j + s_{3_j}) + \lambda_{4_j} \frac{\partial}{\partial x} (x_j - s_{4_j})] = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \beta} = & \frac{\partial}{\partial \beta} \left[\sum_{i=1}^p [\ln(s_{1_i}) + \ln(s_{2_i})] - \sum_{j=1}^n [\ln(s_{3_j}) + \ln(s_{4_j})] \right] = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda_1} = & \frac{\partial}{\partial \lambda_1} [(h(x) + s_1 - h_u)] = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda_2} = & \frac{\partial}{\partial \lambda_2} [(h(x) - s_2 - h_l)] = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda_3} = & \frac{\partial}{\partial \lambda_3} [(x + s_3 - u)] = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda_4} = & \frac{\partial}{\partial \lambda_4} [(x - s_4 - l)] = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial s_1} = & \frac{\partial}{\partial s_1} [S_1^{-1} e - \lambda_1] = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial s_2} = & \frac{\partial}{\partial s_2} [S_2^{-1} e + \lambda_2] = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial s_3} = & \frac{\partial}{\partial s_3} [S_3^{-1} e - \lambda_3] = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial s_4} = & \frac{\partial}{\partial s_4} [S_4^{-1} e + \lambda_4] = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

onde: $S_1 = \text{diag}(s_{11}, \dots, s_{1p})$, $S_2 = \text{diag}(s_{22}, \dots, s_{2p})$, $S_3 = \text{diag}(s_{33}, \dots, s_{3n})$, $S_4 = \text{diag}(s_{44}, \dots, s_{4n})$, $e = [1, \dots, 1]^T$. A solução do sistema de equações não lineares (5) é

obtida pelo método de Newton, cujo sistema linearizado é dado por:

$$\begin{aligned} & \left[\begin{array}{ccc} \nabla_{xx}^2 f(x) & \nabla_{xx}^2 g(x)^t & \nabla_{xx}^2 h(x)^t \end{array} \right] \ddot{A}x + \\ & \nabla_x h(x)^t \ddot{A} \ddot{\Delta} \nabla_x g(x)^t \ddot{A} \ddot{e} = \nabla_x f(x) \\ & \nabla_x g(x)^t \ddot{e} \nabla_x h(x)^t \ddot{\Delta} \nabla_x \ddot{\Delta} = \nabla_x L \\ & \nabla g(x) \nabla_x g(x)^t \ddot{A}x = \nabla_{\ddot{e}} L \\ & \nabla (\nabla_x h(x) \ddot{A}x + \ddot{A}s) = \nabla_{\ddot{\Delta}} L \\ & \nabla (\ddot{A}x + \ddot{A}s) = \nabla_{\ddot{\Delta}} L \\ & \ddot{S}^2 \ddot{A}s \nabla \ddot{A} \ddot{\Delta} = \nabla_{\ddot{s}} L \end{aligned} \quad (6)$$

Rescrevendo na forma matricial, tem-se:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} W(x, \ddot{e}, \ddot{\Delta}, \ddot{\Delta}) & \nabla J(x)^t & \nabla_x h(x)^t & 0 & 0 & \nabla \ddot{A}x \\ \nabla J(x) & 0 & 0 & 0 & 0 & \nabla \ddot{A} \ddot{e} \\ \nabla_x h(x) & 0 & 0 & 0 & 0 & \nabla \ddot{A} \ddot{\Delta} \\ \nabla_x g(x) & 0 & 0 & 0 & 0 & \nabla \ddot{A} \ddot{\Delta} \\ \nabla g(x) & 0 & 0 & 0 & 0 & \nabla \ddot{A} \ddot{\Delta} \\ \nabla (\nabla_x h(x) \ddot{A}x + \ddot{A}s) & 0 & 0 & 0 & 0 & \nabla \ddot{A} \ddot{\Delta} \\ \nabla (\ddot{A}x + \ddot{A}s) & 0 & 0 & 0 & 0 & \nabla \ddot{A} \ddot{\Delta} \\ \nabla (\ddot{S}^2 \ddot{A}s) & 0 & 0 & 0 & 0 & \nabla \ddot{A} \ddot{\Delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{A}x \\ \ddot{A} \ddot{e} \\ \ddot{A} \ddot{\Delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \nabla_x L \\ \nabla_{\ddot{e}} L \\ \nabla_{\ddot{\Delta}} L \\ \nabla_{\ddot{s}} L \end{bmatrix} \quad (7) \\ & = \begin{bmatrix} \nabla_x L \\ \nabla_{\ddot{e}} L \\ \nabla_{\ddot{\Delta}} L \\ \nabla_{\ddot{s}} L \end{bmatrix} \end{aligned}$$

onde:

$$\begin{aligned} W(x, \ddot{e}, \ddot{\Delta}, \ddot{\Delta}) &= \nabla_{xx}^2 f(x) + \sum_{y=1}^m \ddot{e}_y \nabla_{xx}^2 g_y(x) \\ &+ \sum_{i=1}^p \ddot{\Delta}_i \nabla_{xx}^2 h_i(x) \end{aligned}$$

O elemento $\nabla_x h(x)^t$ na matriz Lagrangiana tem as informações dos limites dos fluxos nas linhas de transmissão.

Após a determinação do vetor correção a próxima etapa é calcular os passos $\ddot{\Delta}_p$ e $\ddot{\Delta}_d$ os quais serão usados na atualização das variáveis primais e duais respectivamente. Estes passos são calculados de tal forma que, cada componente das variáveis de folga ou excesso primais (s_i , $i = 1, 2, 3, 4$) permaneçam estritamente positivas, e que os elementos do vetor ($\ddot{\Delta}_i$, $i = 1, 2, 3, 4$) permaneçam com os seus respectivos sinais, $\ddot{\Delta}_1 < 0$, $\ddot{\Delta}_2 > 0$, $\ddot{\Delta}_3 < 0$, $\ddot{\Delta}_4 > 0$. Isto é realizado encontrando-se o menor elemento entre o mínimo tamanho de passo de todos os componentes dos vetores. Este menor elemento é então multiplicado por um fator menor que 1 (para garantir que o próximo ponto irá satisfazer as condições de positividade) e comparado com 1, o menor entre eles é então escolhido. Isto se traduz por:

$$\hat{\alpha}_p = \hat{\alpha} \min \left\{ \min_{\ddot{A}s_i < 0} \frac{s_i}{|\ddot{A}s_i|}, 1.0 \right\} \quad (8)$$

$$\hat{\alpha}_d = \hat{\alpha} \min \left\{ \min_{\ddot{A}\ddot{\Delta}_1 < 0} \frac{\ddot{\Delta}_1}{|\ddot{A}\ddot{\Delta}_1|}, \min_{\ddot{A}\ddot{\Delta}_2 > 0} \frac{\ddot{\Delta}_2}{|\ddot{A}\ddot{\Delta}_2|}, 1.0 \right\} \quad (9)$$

onde:

$\hat{\alpha} = 0.9995$ é um valor determinado empiricamente, de acordo com Wright (5), pode ser derivado da formula $1/\sqrt[9]{m}$, onde m é o número de restrições do problema.

Conhecendo o vetor correção e os passos primais e duais as variáveis do problema podem ser atualizadas como:

$$\begin{aligned} x^{new} &= x^{old} + \hat{\alpha}_p \ddot{A}x \\ s^{new} &= s^{old} + \hat{\alpha}_p \ddot{A}s \\ \ddot{\Delta}^{new} &= \ddot{\Delta}^{old} + \hat{\alpha}_d \ddot{A}\ddot{\Delta} \\ \ddot{e}^{new} &= \ddot{e}^{old} + \hat{\alpha}_d \ddot{A}\ddot{e} \end{aligned} \quad (10)$$

3.1 Atualização do parâmetro de barreira

Granville (3) verificou que o valor do multiplicador $\ddot{\Delta}$ para cada ponto é proporcional ao gap de dualidade. Este gap é a diferença entre o valor da função objetivo do problema primal e do problema dual. A cada iteração o valor de $\ddot{\Delta}$ deverá ser calculado tal que o seu valor atual seja sempre inferior ao anterior, desta forma o cálculo para a atualização de $\ddot{\Delta}$ corresponde ao gap de dualidade:

$$\ddot{\Delta} = \frac{(\ddot{s}_1 \ddot{\Delta}_1 + \ddot{s}_3 \ddot{\Delta}_3) + (\ddot{s}_2 \ddot{\Delta}_2 + \ddot{s}_4 \ddot{\Delta}_4)}{2n\hat{\alpha}} \quad (11)$$

onde:

$\ddot{\Delta} > 1$ é especificado pelo usuário.

Na Eq. (11) o parâmetro $\ddot{\Delta}$ é reduzido a cada iteração empiricamente, pois o valor de $\ddot{\Delta}$ é determinado pelo usuário. Uma escolha não adequada deste parâmetro poderá comprometer a convergência do método. Uma outra opção para atualização de $\ddot{\Delta}$, é reduzi-lo de um valor $\ddot{\Delta}^*$ especificado pelo usuário, a cada iteração, isto é:

$$\ddot{\Delta}^{(k+1)} = \frac{\ddot{\Delta}^k}{\hat{\alpha}^k} \quad (12)$$

Na implementação do algoritmo primal-dual barreira-logarítmica realizada neste artigo, com o objetivo de resolver o problema de fluxo de potência ótimo, utilizou-se a Eq. (12) para atualização do parâmetro de barreira, devido a sua eficiência e facilidade de implementação.

3.1.1 Algoritmo

O problema de despacho ótimo de potência ativa e reativa AC com restrição na transmissão é resolvido iterativamente pelo algoritmo apresentado a seguir:

Iniciar:

Colocar o problema original na forma mostrada em (4). Iniciar o vetor $x = (V, \lambda, t)$, as variáveis de folga e excesso, os multiplicadores de Lagrange, o parâmetro de barreira μ e o parâmetro α para a atualização de μ . Atribuir um valor para o erro ϵ .

Passo Principal:

1. Calcular o vetor gradiente.
2. Se todos os elementos do vetor gradiente forem menor que ϵ e as condições de KKT satisfeitas então PARE, caso contrário:
3. Calcular a matriz Lagrangiana e resolver o sistema (7).
4. Calcular os passos por (8) e (9).
5. Atualizar as variáveis (10) e o parâmetro μ por (12).
6. Voltar ao passo 1.

Com respeito a factibilidade, assume-se que a estimativa inicial para as variáveis primais e duais pertença à região factível das restrições do problema e satisfaça as restrições de igualdade lineares Eq. (2b-e). A restrição de igualdade não linear Eq. (2a) somente estará satisfeita para uma tolerância pré-especificada, próximo à solução ótima.

4.0 - IMPLEMENTAÇÃO

O método é caracterizado pela transformação do problema original (1) em um problema irrestrito, através da função Lagrangiana, L . As condições de otimalidade geram um sistema de equações não linear, que é tratado pelo método de Newton. O sistema linear resultante tem a seguinte forma:

$$\mu^2 L \ddot{A} = \mu \dot{L} \quad (13)$$

onde: $\mu^2 L$ é a matriz Lagrangiana, \ddot{A} é o vetor das correções e $\mu \dot{L}$ é o gradiente de L .

O maior esforço do algoritmo é no tratamento das matrizes da Lagrangiana $\mu^2 L$. A implementação foi realizada usando a fatoração por elementos (6) e não por blocos como proposto por Granville (3). Embora não possamos utilizar algoritmos clássicos para a fatoração da matriz Lagrangiana, temos um melhor aproveitamento da sua esparsidade. A matriz $\mu^2 L$ é esparsa e simétrica. É necessário calcular e armazenar somente metade da fatoração LU devido à simetria. A estrutura da matriz é constante durante as iterações, a ordenação e análise simbólica é feita somente uma vez para criar a estrutura estática dos dados. Então a fatoração numérica é realizada a cada iteração de forma eficiente através da rotina MA57.

5.0 - RESULTADOS

O algoritmo foi implementado em FORTRAN, usando dupla precisão aritmética em um microcomputador Pentium III – 600 MHz, com 128 Mbytes de memória RAM. A função objetivo utilizada foi minimizar as perdas de potência ativa na transmissão para os sistemas: de 8 e IEEE118 barras. Esta função objetivo

é não linear, não convexa tornando o problema de difícil solução. O critério de parada foi satisfazer as condições de KKT e garantir a convergência na região factível a um erro máximo para as restrições de igualdade de 10^{-4} pu.

5.1 Sistema de 8 barras

O sistema de 8 barras é representado na Figura 1. O sistema é composto de 1 barra de referência, 1 barra de geração, 6 barras de carga, 9 linhas de transmissão, 2 transformadores com o tap variável. Os limites superiores e inferiores da magnitude de tensão e dos tap são 1,1 e 0,9 respectivamente. Os limites de geração ativa, P_i^G , reativa Q_i^G e do fluxo ativo FP_{ij} estão representados na Figura 1.

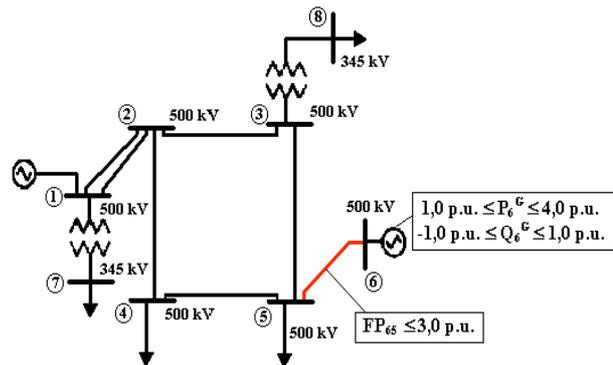


FIGURA 1 – SISTEMA DE 8 BARRAS

Na Tabela 1 apresenta-se os valores iniciais adotados para o parâmetro de barreira da tensão (μ_v), da potência ativa gerada (μ_P), da potência reativa gerada (μ_Q), dos limites de fluxo ativo nas linhas (μ_{FP}) e dos tap's (μ_t). Os respectivos fatores de atualização α 's também são mostrados na Tabela 1. O processo de atualização dos valores de μ segue o definido na Eq. (12). Reitera-se que os valores apresentados na Tabela 1 são resultados de inúmeros testes efetuados durante o desenvolvimento deste trabalho e influenciam diretamente no número de iterações necessárias para a convergência do programa. Os valores dos multiplicadores de Lagrange relacionados às equações do fluxo de potência iniciam iguais a 0,0 ($\mu_{P_i} = 0,0$ e $\mu_{Q_i} = 0,0$). As variáveis de folga ou excesso (s_i) bem como os respectivos multiplicadores de Lagrange (λ_i) são calculados de acordo com o apresentado na seção 3.

TABELA 1 – VALORES INICIAIS PARA OS PARÂMETROS DE BARREIRA E SEUS FATORES DE ATUALIZAÇÃO PARA O SISTEMA 8 BARRAS

μ Iniciais		Atualizadores	
μ_v	0,01	μ_v	1,1
μ_P	0,01	μ_P	1,1
μ_Q	0,01	μ_Q	1,5
μ_{FP}	0,0001	μ_{FP}	5
μ_t	0,1	μ_t	1,01

Os resultados apresentados consideraram o limite de fluxo ativo na linha de transmissão entre as barras 5 (Barra de Carga) e 6 (Barra de Geração) de 3,0 p.u.. O sistema convergiu em 12 iterações, satisfazendo as restrições de igualdade, as restrições de desigualdade e as condições de KKT com uma precisão (ϵ) de 10^{-4} p.u.. Na Figura 2 pode-se observar a trajetória de convergência das tensões, verificando-se que as tensões em todas as barras permanecem dentro dos limites estipulados. Na Figura 3 mostra-se a curva de convergência do máximo erro de potência ativa (ΔP_{\max}) e reativa (ΔQ_{\max}) do sistema.

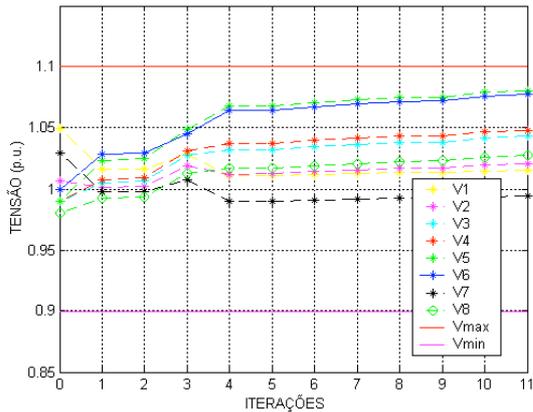


FIGURA 2 – CONVERGÊNCIA DAS TENSÕES PARA O SISTEMA 8 BARRAS COM RESTRIÇÃO NAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

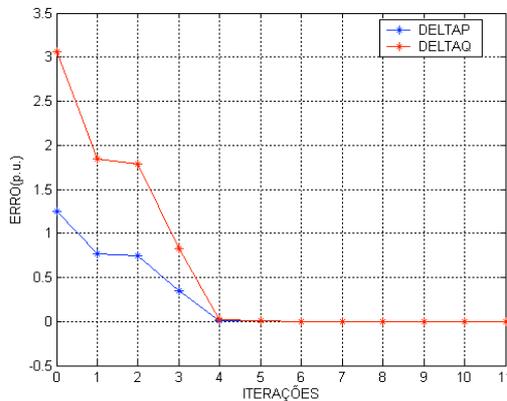


FIGURA 3 – CONVERGÊNCIA DO ΔP_{\max} E DO ΔQ_{\max} PARA O SISTEMA 8 BARRAS COM RESTRIÇÃO NAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

A barra de geração (barra 6) possui limites de geração, tanto de potência ativa quanto de potência reativa. As Figuras 4 e 5 mostram o processo de convergência da geração.

A Figura 4 mostra que apesar da barra de geração ter capacidade de gerar até 400 MW, a mesma tem que restringir a sua geração ao limite de 300 MW. Este limite é imposto pela restrição de fluxo ativo na linha que interliga a barra de geração ao resto do sistema. Em teste realizado sem o limite na transmissão a geração na barra 6 atingiu o limite de 400 MW para minimizar as perdas ativa na transmissão.

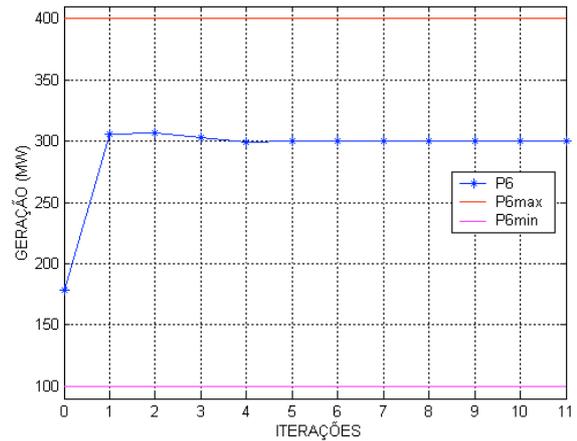


FIGURA 4 – CONVERGÊNCIA PARA POTÊNCIA ATIVA DA BARRA DE GERAÇÃO (BARRA 6) PARA O SISTEMA 8 BARRAS COM RESTRIÇÃO NAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

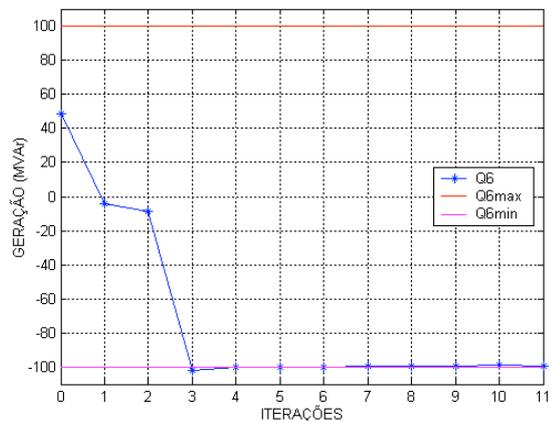


FIGURA 5 – CONVERGÊNCIA PARA POTÊNCIA REATIVA DA BARRA DE GERAÇÃO (BARRA 6) PARA O SISTEMA 8 BARRAS COM RESTRIÇÃO NAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

A Figura 6 apresenta o processo de convergência para o fluxo ativo na linha 6-5 e as perdas totais do sistema.

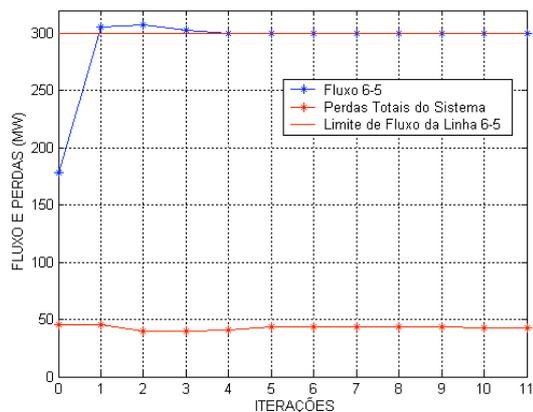


FIGURA 6 – CONVERGÊNCIA PARA AS PERDAS TOTAIS E FLUXO LIMITADO NA LINHA 6-5 PARA O SISTEMA 8 BARRAS

O valor final encontrado para as perdas totais do sistema foi de 42,87 MW.

5.2 Sistema de 118 barras

O sistema IEEE118 é composto de 1 barra de referência, 17 barras de geração, 34 barras de controle de reativo, 66 barras de carga, 179 linhas de transmissão, 9 transformadores com *tap* variável. Utilizando o programa computacional de despacho ótimo implementado, tivemos que todas as variáveis do sistema permaneceram dentro de seus limites pré-estabelecidos. O sistema convergiu em 25 iterações, e as perdas foram de 98,18MW.

A linha de transmissão entre as barras 24 e 72 tem um limite de fluxo de 8MW. A Figura 7 apresenta a trajetória de convergência do fluxo na linha de transmissão 24-72, observa-se que na segunda iteração o limite é atingido e mantido até o final do processo. A Figura 8 apresenta o comportamento da função objetivo.

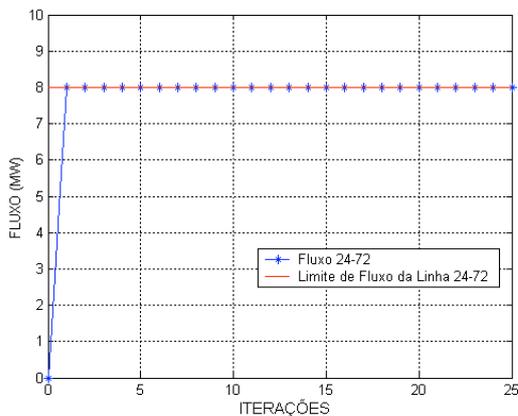


FIGURA 7 – FLUXO ENTRE AS BARRAS 24 E 72 PARA O SISTEMA IEEE118 BARRAS

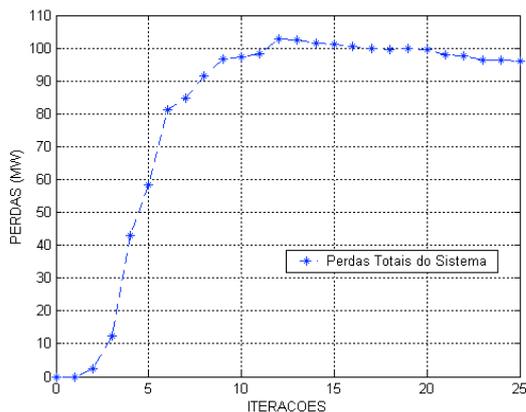


FIGURA 8 – CONVERGÊNCIA DA FUNÇÃO OBJETIVO PARA O SISTEMA IEEE118 BARRAS

As perdas aumentam com a inclusão do limite de fluxo em 1,61 %. Para manter o fluxo constante na linha 24-72 ocorreu uma mudança no despacho ativo na geração quando comparado com o sistema sem restrição de fluxo. A maior variação foi de 2,83 % na barra de geração 89. Nos dois testes realizados todas

as tensões, taps, limites de fluxo e geração permaneceram dentro de seus limites, e a solução final obedeceu a todas as restrições do sistema, satisfazendo KKT com uma precisão de 10^{-4} p.u.

6.0 - CONCLUSÃO

O artigo apresenta um eficiente algoritmo primal-dual barreira logarítmica (PDBL) para resolver o problema de despacho ótimo de potência ativa e reativa AC com restrição na transmissão. As restrições na transmissão são incorporadas à matriz Lagrangiana e tratadas diretamente, aumentando a eficiência do método. Restrições na transmissão dificultam a convergência do algoritmo, pois exigem uma diferença de potencial praticamente constante entre as barras, quando o limite é atingido. O estudo permite verificar quais são as barras de geração mais solicitadas devido ao limite na transmissão. Esta técnica junto ao problema energético permitirá estudos para a determinação do melhor despacho energético levando-se em consideração os limites elétricos da rede.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Carpentier, J. L. Contribution a L'étude du Dispatching Economique. *Bull-Soc. Fr. Elec. Ser. B3*, p. 431-447, 1962.
- (2) Christie, R. D., Wollenberg, B. F., Wangensteen, I. Transmission Management in the Deregulated Environment, *Proceedings of the IEEE*, vol. 88 no. 2, February 2000.
- (3) Granville, S. Optimal Reactive Dispatch Through Interior Point Methods. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, p. 136-146, February 1994.
- (4) Fiacco, A. V., McCormick, G. P. Nonlinear programming: Sequential Unconstrained Minimization Techniques, John Wiley & Sons, 1968.
- (5) Wright, M. H. Why a Pure Primal Newton Barrier Step May Be Infeasible? *SIAM Journal on Optimization*, vol. 5, no. 1, p. 1-12, 1995.
- (6) Da Costa, G.R.M., Costa, C.E.U. Improved Newton Method for Optimal Power Flow problem. *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 22, p. 459-462, 2000.