



Método Preditor-Corretor com correções em todas as Condições de Otimalidade para o problema de Fluxo de Potência Ótimo

Roy Wilhelm Probst

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Curitiba – PR

rwprobst@utfpr.edu.br

Aurelio Ribeiro Leite de Oliveira

Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

Campinas – SP

aurelio@ime.unicamp.br

RESUMO

Um método de pontos interiores preditor-corretor é desenvolvido para o problema de fluxo de potência ótimo ativo-reativo. As tensões são representadas em coordenadas cartesianas ao invés de coordenadas polares, pois estas permitem correções não lineares nas restrições de factibilidade primal e dual e não apenas nas condições de complementariedade como nos métodos tradicionais de programação não-linear. Experimentos computacionais com sistemas de teste IEEE e um sistema real brasileiro são apresentados e mostram as vantagens do método proposto.

PALAVRAS CHAVE. Métodos de Pontos Interiores. Sistemas de Potência. Método Preditor-Corretor.

Tópicos: PO na Área de Energia.

ABSTRACT

A predictor-corrector interior-point method is developed in order to deal with the AC active and reactive optimal power flow problem. Voltage rectangular coordinates is adopted instead of polar ones, since, as it is quadratic, it allows nonlinear corrections for the primal and dual feasibility conditions and not only for the complementary constraints as in the traditional nonlinear programming methods. Computational experiments for IEEE test systems and a real Brazilian system are presented and show the advantages of the proposed approach.

KEYWORDS. Interior-point methods. Power systems. Predictor-corrector method.

Paper topics: OR in Energy.



Introdução

O cálculo de fluxo de potência é uma ferramenta importante envolvendo análise numérica aplicada à sistemas de potência. A modelagem do sistema é estática e considera que as variações com o tempo são suficientemente lentas para que se possa ignorar os efeitos transitórios, que só poderiam ser levadas em consideração se fosse utilizada uma modelagem dinâmica envolvendo equações diferenciais [Monticelli, 1983]. Fluxo de potência ótimo é o problema de otimização que tem como restrição as equações de balanço de potência provenientes do cálculo de fluxo de potência e como função objetivo alguma medida de desempenho [Momoh et al., 1999a,b]. A importância do fluxo de potência ótimo é planejar a expansão do sistema de potência, assim como determinar o melhor ponto de operação para os sistemas existentes. A solução do problema fornece o perfil da tensão e a injeção de potência ativa e reativa em cada barra.

O problema de fluxo de potência ótimo (AC) teve sua primeira formulação nos anos 60, com o problema de despacho econômico de [Carpentier, 1962]. Desde então, vários métodos de otimização foram propostos para resolver este problema. Na década de 80, a publicação do trabalho de [Karmarkar, 1984] iniciou uma nova linha de pesquisa conhecida como métodos de pontos interiores, e uma década depois os métodos primais-duais surgiram como os métodos mais importantes e úteis desta classe de problemas [Wright, 1996]. Entre os métodos primais-duais, destaca-se o método preditor-corretor de [Mehrotra, 1992], que passou a ser a base da maioria dos códigos relacionados a pontos interiores. A contribuição de Mehrotra foi combinar ideias já existentes e adicionar heurísticas para escolha do parâmetro de centragem, tamanho do passo e ponto inicial.

Devido ao tamanho e características especiais dos problemas, os métodos de pontos interiores mostraram-se uma boa alternativa para os problemas de fluxo de potência ótimo. [Granville, 1994] propôs a implementação do método primal-dual barreira logarítmica para o problema de despacho reativo. No mesmo ano, [Wu et al., 1994] apresentam o problema de fluxo de potência ótimo com a variante preditor-corretor do método primal-dual. [Torres e Quintana, 1998] combinam os métodos de pontos interiores com a utilização de coordenadas cartesianas para representar a tensão. Atualmente os métodos de pontos interiores estão entre os mais utilizados na área de sistemas de potência devido a sua velocidade e robustez [Garzillo et al., 1999; Quintana et al., 2000].

Neste trabalho é proposto um método preditor-corretor com correção em todas as condições de otimalidade para o problema de fluxo de potência ótimo com coordenadas cartesianas [Probst e Oliveira, 2015].

Problema de Fluxo de Potência Ótimo Ativo-Reativo

A representação mais comum da tensão (V_k) utilizada nos estudos de sistemas de potência é através de coordenadas polares. Entretanto, a representação em coordenadas cartesianas pode ser vantajosa, pois a Hessiana é constante e a expansão de Taylor é exata para o termo de ordem dois. A vantagem de trabalhar com coordenadas polares, que modelam facilmente a magnitude das tensões, perde importância devido ao tratamento eficiente de desigualdades proporcionado pelos métodos de pontos interiores. Portanto, as tensões serão representadas em coordenadas cartesianas [Torres e Quintana, 1998]:

$$V_k = e_k + jf_k$$

onde e_k e f_k são os componentes reais e imaginários da tensão, respectivamente.

As injeções de potência ativa (P) e reativa (Q) podem ser obtidas a partir das tensões:

$$\begin{aligned} P &= EGe + FGf + FBe - EBf \\ Q &= FGe - EGf - EBe - FBf \end{aligned}$$

onde E e F são matrizes diagonais de e e f , G e B são as matrizes de condutância e susceptância do sistema de potência, respectivamente.

O problema de fluxo de potência ótimo consiste em determinar o estado de operação ótimo de um sistema elétrico de geração/transmissão de potência, minimizando simultaneamente uma



determinada função objetivo e satisfazendo algumas restrições físicas e operacionais. Definindo $x = (ef)^t$, este problema pode ser formulado como [Monticelli, 1983]:

$$\begin{aligned}
 \min \quad & \phi(x) \\
 \text{s.a} \quad & P_k(x) + P_k^C - P_k^G = 0 \quad \forall k \in C \\
 & Q_k(x) + Q_k^C - Q_k^G = 0 \quad \forall k \in C \\
 & (v_k^{\min})^2 \leq V_k(x) \leq (v_k^{\max})^2 \quad \forall k \in N \\
 & P_k^{\min} \leq P_k(x) \leq P_k^{\max} \quad \forall k \in G \\
 & Q_k^{\min} \leq Q_k(x) \leq Q_k^{\max} \quad \forall k \in R
 \end{aligned} \tag{1}$$

onde para cada barra k , V é o quadrado da magnitude da tensão; P^C e Q^C são as demandas de potência ativa e reativa; P^G e Q^G são as gerações de potência ativa e reativa; v^{\min} e v^{\max} são os limites de magnitude da tensão; P^{\min} e P^{\max} são os limites de injeção de potência ativa; Q^{\min} e Q^{\max} são os limites de injeção de potência reativa, respectivamente. O conjunto de índices representam todas as barras do sistema (N), barras de carga (C), barras de geração de potência ativa (G) e barras de controle de potência reativa (R).

A função objetivo representa diferentes critérios de desempenho dos sistemas elétricos, como a diferença de injeção de potência ativa calculada e planejada ou injeção de potência ativa na barra de folga. Neste trabalho a função objetivo será dada pela minimização das perdas de potência ativa nas linhas de transmissão:

$$\phi(x) = e^t G e + f^t G f.$$

Métodos de Pontos Interiores

A formulação do fluxo de potência ótimo pode ser obtido a partir do modelo de programação não-linear:

$$\begin{aligned}
 \min \quad & f(x) \\
 \text{s.a} \quad & g(x) = 0 \\
 & h^{\min} \leq h(x) \leq h^{\max}.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Na dedução dos métodos de pontos interiores [Wright, 1996], as restrições de desigualdade são transformadas em igualdades adicionando variáveis de folga:

$$\begin{aligned}
 \min \quad & f(x) \\
 \text{s.a} \quad & g(x) = 0 \\
 & h(x) + s_1 = h^{\max} \\
 & h(x) - s_2 = h^{\min} \\
 & (s_1, s_2) \geq 0.
 \end{aligned}$$

As condições de não negatividade dessas variáveis é imposta adicionando uma barreira logarítmica à função objetivo:

$$\begin{aligned}
 \min \quad & f(x) - \mu \sum_i (\ln s_{1i} + \ln s_{2i}) \\
 \text{s.a} \quad & g(x) = 0 \\
 & s_1 + h(x) - h^{\max} = 0 \\
 & s_2 - h(x) + h^{\min} = 0.
 \end{aligned} \tag{3}$$

A função Lagrangiana do problema (3) é dada por:

$$L = f(x) - \mu \sum_i (\ln s_{1i} + \ln s_{2i}) + y^t g(x) + z_1^t (s_1 + h(x) - h^{\max}) + z_2^t (s_2 - h(x) + h^{\min}).$$



Um mínimo local de (3) pode ser expresso como um ponto estacionário da função Lagrangiana e satisfaz as condições de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) de primeira ordem:

$$\nabla_x f(x)^t + \nabla_x g(x)^t y + \nabla_x h(x)^t (z_1 - z_2) = 0 \quad (4)$$

$$S_1 Z_1 u - \mu u = 0 \quad (5)$$

$$S_2 Z_2 u - \mu u = 0 \quad (6)$$

$$g(x) = 0 \quad (7)$$

$$s_1 + h(x) - h^{\max} = 0 \quad (8)$$

$$s_2 - h(x) + h^{\min} = 0 \quad (9)$$

onde S_1, S_2, Z_1 e Z_2 são as matrizes diagonais de s_1, s_2, z_1 e z_2 , respectivamente; u é o vetor de uns de dimensão apropriada. As equações (7)-(9) e $(s_1, s_2) > 0$ garantem a factibilidade primal; (4) e $(z_1, z_2) > 0$ garantem a factibilidade dual; enquanto que (5)-(6) são perturbações ($\mu > 0$) das condições de complementariedade ($\mu = 0$).

Método Primal-Dual Clássico

Aplicando o método de Newton para resolver as equações (4)-(9), a seguinte matriz Jacobiana (J) é obtida:

$$J = \begin{bmatrix} \nabla_{xx}^2 L & 0 & 0 & \nabla_x g(x)^t & \nabla_x h(x)^t & -\nabla_x h(x)^t \\ 0 & Z_1 & 0 & 0 & S_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 & 0 & 0 & S_2 \\ \nabla_x g(x) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \nabla_x h(x) & I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\nabla_x h(x) & 0 & I & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

e o sistema linear

$$J \times \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta s_1 \\ \Delta s_2 \\ \Delta y \\ \Delta z_1 \\ \Delta z_2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \\ r_5 \\ r_6 \end{bmatrix} \quad (10)$$

onde os resíduos r_1 - r_6 são o lado esquerdo das equações (4)-(9), respectivamente.

Após a determinação da direção de Newton, o tamanho do passo é calculado para assegurar que o novo ponto seja estritamente positivo. O método primal-dual clássico resolve o sistema (10) e o parâmetro de barreira ($\mu > 0$) decresce monotonicamente para zero durante o progresso das iterações. O parâmetro de barreira μ^k é atualizado pela fórmula:

$$\mu^k = \sigma^k \gamma^k,$$

onde γ^k é a média dos produtos $x_i^k z_i^k$ e o parâmetro σ^k é dado pela heurística [El-Bakry et al., 1996]:

$$\sigma^k = \min(0.2, 100(s_1^t z_1 + s_2^t z_2)).$$

Método Preditor-Corretor

O método preditor-corretor resolve dois sistemas lineares a cada iteração usando a mesma fatoração da matriz. Primeiro, a direção preditora é determinada pela direção afim ($\mu = 0$):

$$J \times \begin{bmatrix} \Delta \tilde{x} \\ \Delta \tilde{s}_1 \\ \Delta \tilde{s}_2 \\ \Delta \tilde{y} \\ \Delta \tilde{z}_1 \\ \Delta \tilde{z}_2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \nabla_x f(x)^t + \nabla_x g(x)^t y + \nabla_x h(x)^t (z_1 - z_2) \\ S_1 Z_1 u \\ S_2 Z_2 u \\ g(x) \\ s_1 + h(x) - h^{\max} \\ s_2 - h(x) + h^{\min} \end{bmatrix}.$$



Em seguida, a solução é utilizada para estimar μ e a correção da direção corretora:

$$J \times \begin{bmatrix} \Delta \hat{x} \\ \Delta \hat{s}_1 \\ \Delta \hat{s}_2 \\ \Delta \hat{y} \\ \Delta \hat{z}_1 \\ \Delta \hat{z}_2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 0 \\ \tilde{S}_1 \tilde{Z}_1 u - \mu u \\ \tilde{S}_2 \tilde{Z}_2 u - \mu u \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

A direção de busca é a soma das direções preditora e corretora.

Para atualizar μ^k , defina $\tilde{\gamma}^k$ como a média dos produtos $\tilde{x}_i \tilde{z}_i$, caso a direção afim fosse usada. Se $\tilde{\gamma}^k \ll \gamma^k$, então a direção afim é uma boa direção de busca e μ^k deve estar próximo de 0. Se $\tilde{\gamma}^k$ está próximo de γ^k , então μ^k deve estar próximo de 1 [Wright, 1996]. Para isso, [Mehrotra, 1992] sugere a seguinte heurística:

$$\sigma^k = \left(\frac{\tilde{\gamma}^k}{\gamma^k} \right)^3.$$

Embora os métodos preditor-corretor sejam muito eficientes em programação linear, existe uma desvantagem em programação não-linear: eles não calculam nenhuma correção nas condições de factibilidade primal e dual.

Método Preditor-Corretor Completo

O uso de coordenadas cartesianas para representar a tensão em problemas de fluxo de potência ótimo permite correções em todas as condições de otimalidade e não apenas nas de complementariedade, como no métodos tradicionais de programação não-linear. Estas novas correções melhoram o desempenho computacional do método preditor-corretor. Comparando a formulação (1) com (2):

$$g(x) = \begin{bmatrix} g^P(x) \\ g^Q(x) \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad h(x) = \begin{bmatrix} h^V(x) \\ h^P(x) \\ h^Q(x) \end{bmatrix}$$

onde

$$\begin{aligned} g^P(x) &= P(x) + P^C - P^G \\ g^Q(x) &= Q(x) + Q^C - Q^G \\ h^V(x) &= V(x) \\ h^P(x) &= P(x) \\ h^Q(x) &= Q(x) \\ P(x) &= EGe + FGf + FBe - EBf \\ Q(x) &= FGe - EGf - EBe - FBf \\ V(x) &= Ee + Ff \end{aligned}$$

para o conjunto apropriado de índices.

Métodos preditor-corretor tradicionais para programação não-linear calculam correções somente nas restrições de complementariedade. As correções não são aplicadas nas demais restrições porque geralmente resultam em expressões muito complicadas ou mesmo impossíveis de obter analiticamente. No entanto, ao utilizar o modelo em coordenadas cartesianas para o problema de fluxo de potência ótimo, estas correções podem ser obtidas analiticamente pois todas as restrições são quadráticas.

As restrições de balanço de potência podem ser expressas de forma geral como:

$$XAx - b = 0. \quad (12)$$



Aplicando o método de Newton:

$$(XA + \text{diag}(Ax))\Delta x = b - XAx.$$

Substituindo $\tilde{x} = x + \Delta x$ na equação original:

$$\begin{aligned} \tilde{X}A\tilde{x} - b &= (X + \Delta X)A(x + \Delta x) - b \\ &= XAx + \Delta XA\Delta x - b + (b - XAx) \\ &= \Delta XA\Delta x, \end{aligned} \quad (13)$$

pois $\Delta XAx = \text{diag}(Ax)\Delta x$. Assim, a correção não linear para (12) é dada por

$$\Delta XA\Delta x.$$

Para obter as equações duais é necessário definir a função objetivo. Utilizando uma função quadrática genérica $\phi(x) = x^t Hx$ e desprezando as canalizações, a função Lagrangiana do problema é dada por $L(x, y) = x^t Hx + y^t (XAx - b)$.

As equações duais ($\nabla_x L = 0$) podem ser obtidas a partir da Lagrangiana:

$$2Hx + A^t Yx + YAx = 0. \quad (14)$$

Aplicando o método de Newton:

$$(2H + A^t Y + YA)\Delta x + (A^t X + \text{diag}(Ax))\Delta y = -2Hx - A^t Yx - YAx.$$

Substituindo $(\tilde{x}, \tilde{y}) = (x, y) + (\Delta x, \Delta y)$ na equação original e procedendo analogamente às equações primais (13):

$$2H\tilde{x} + A^t \tilde{Y}\tilde{x} + \tilde{Y}A\tilde{x} = A^t \Delta Y \Delta x + \Delta Y A \Delta x,$$

pois $\Delta YAx = \text{diag}(Ax)\Delta y$ e $A^t \Delta Yx = A^t X \Delta y$. Assim, a correção não linear para (14) é dada por

$$A^t \Delta Y \Delta x + \Delta Y A \Delta x.$$

Fluxo de Potência Ótimo

Conforme deduzido na subseção anterior, as correções a serem usadas no sistema (11) são:

$$\begin{aligned} \hat{r}_1 &= \begin{bmatrix} \nabla_x P(\Delta\tilde{x})^t \Delta\tilde{y}_p + \nabla_x P(\Delta\tilde{x})^t \Delta\tilde{z}_{1p} - \nabla_x P(\Delta\tilde{x})^t \tilde{z}_{2p} \\ \nabla_x Q(\Delta\tilde{x})^t \Delta\tilde{y}_q + \nabla_x Q(\Delta\tilde{x})^t \Delta\tilde{z}_{1q} - \nabla_x Q(\Delta\tilde{x})^t \tilde{z}_{2q} \end{bmatrix}, \\ \hat{r}_2 &= \begin{bmatrix} \Delta\tilde{S}_{1v} \Delta\tilde{z}_{1v} - \mu u \\ \Delta\tilde{S}_{1p} \Delta\tilde{z}_{1p} - \mu u \\ \Delta\tilde{S}_{1q} \Delta\tilde{z}_{1q} - \mu u \end{bmatrix}, \quad \hat{r}_3 = \begin{bmatrix} \Delta\tilde{S}_{2v} \Delta\tilde{z}_{2v} - \mu u \\ \Delta\tilde{S}_{2p} \Delta\tilde{z}_{2p} - \mu u \\ \Delta\tilde{S}_{2q} \Delta\tilde{z}_{2q} - \mu u \end{bmatrix}, \\ \hat{r}_4 &= \begin{bmatrix} P(\Delta\tilde{x}) \\ Q(\Delta\tilde{x}) \end{bmatrix}, \quad \hat{r}_5 = \begin{bmatrix} V(\Delta\tilde{x}) \\ P(\Delta\tilde{x}) \\ Q(\Delta\tilde{x}) \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \hat{r}_6 = \begin{bmatrix} -V(\Delta\tilde{x}) \\ -P(\Delta\tilde{x}) \\ -Q(\Delta\tilde{x}) \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

onde:

$$\begin{aligned} P(\Delta\tilde{x}) &= \Delta\tilde{E}G\Delta\tilde{e} + \Delta\tilde{F}G\Delta\tilde{f} + \Delta\tilde{F}B\Delta\tilde{e} - \Delta\tilde{E}B\Delta\tilde{f} \\ Q(\Delta\tilde{x}) &= \Delta\tilde{F}G\Delta\tilde{e} - \Delta\tilde{E}G\Delta\tilde{f} - \Delta\tilde{E}B\Delta\tilde{e} - \Delta\tilde{F}B\Delta\tilde{f} \\ V(\Delta\tilde{x}) &= \Delta\tilde{E}\Delta\tilde{e} + \Delta\tilde{F}\Delta\tilde{f} \\ \nabla_x P(\Delta\tilde{x}) &= \begin{bmatrix} \Delta\tilde{E}G + \Delta\tilde{F}B + \text{diag}(G\Delta\tilde{e} - B\Delta\tilde{f}) \\ \Delta\tilde{F}G - \Delta\tilde{E}B + \text{diag}(G\Delta\tilde{f} + B\Delta\tilde{e}) \end{bmatrix} \\ \nabla_x Q(\Delta\tilde{x}) &= \begin{bmatrix} \Delta\tilde{F}G - \Delta\tilde{E}B - \text{diag}(G\Delta\tilde{f} + B\Delta\tilde{e}) \\ -\Delta\tilde{E}G - \Delta\tilde{F}B + \text{diag}(G\Delta\tilde{e} - B\Delta\tilde{f}) \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

As correções devem considerar também o conjunto apropriado de índices.



Experimentos Computacionais

Todos os testes foram realizados utilizando a linguagem de programação MATLAB 7.8 (R2009a) em um computador com processador Intel Core 2 Quad Q9550 2.83 GHz, com 3.23 GB de memória RAM e sistema operacional MS Windows XP.

A Tabela 1 mostra as dimensões dos sistemas de potência utilizados nos testes ($|B|$ é a quantidade de linhas de transmissão). O sistema BRASIL representa uma versão do sistema interconectado brasileiro e os demais são sistemas de teste da IEEE de diferentes tamanhos.

Sistema	Barras e linhas				
	$ N $	$ G $	$ R $	$ C $	$ B $
IEEE14	14	5	5	9	20
IEEE30	30	6	6	24	41
IEEE118	118	54	54	64	186
BRASIL	2257	201	201	2056	3509

Tabela 1: Power Systems

Antes da resolução dos sistemas lineares, a dimensão do problema é reduzida através da eliminação de variáveis, o que não altera o padrão esparsa do problema. A soma das capacidades de geração de potência ativa é 25% maior que a soma das cargas ativas. A precisão adotada no critério de parada é a norma do resíduo menor que 10^{-6} . Dois casos são considerados para os limites da magnitude de tensão nos sistemas IEEE: $v_k \in [0.90, 1.10]$ e $v_k \in [0.95, 1.05]$. O ponto inicial utilizado para as variáveis primais é $e_k = 1$ e $f_k = 0$ e as outras variáveis também são inicializadas com valor 1.

As Tabelas 2 and 3 mostram o desempenho dos métodos: primal-dual clássico (PD), preditor-corretor clássico (PC) e preditor-corretor completo (PCC) proposto, com $v_k \in [0.90, 1.10]$.

Sistema	Métodos		
	PD	PC	PCC
IEEE14	11	11	8
IEEE30	12	9	8
IEEE118	17	17	15

Tabela 2: Iterações com $v_k \in [0.90, 1.10]$

Sistema	Métodos		
	PD	PC	PCC
IEEE14	0.03	0.03	0.02
IEEE30	0.04	0.03	0.03
IEEE118	0.44	0.46	0.41

Tabela 3: Tempo (s) com $v_k \in [0.90, 1.10]$

As Tabelas 4 e 5 mostram os resultados obtidos com $v_k \in [0.95, 1.05]$.

Sistema	Métodos		
	PD	PC	PCC
IEEE14	12	10	9
IEEE30	12	9	9
IEEE118	23	24	18

Tabela 4: Iterações com $v_k \in [0.95, 1.05]$

Sistema	Métodos		
	PD	PC	PCC
IEEE14	0.03	0.02	0.02
IEEE30	0.04	0.03	0.03
IEEE118	0.60	0.65	0.49

Tabela 5: Tempo (s) com $v_k \in [0.95, 1.05]$

Para simular diferentes situações no sistema BRASIL, a soma das capacidades de geração de potência ativa assume os valores 10%, 15% e 20% maiores que a soma das cargas ativas. Apenas o caso $v_k \in [0.90, 1.10]$ é considerado e a precisão no critério de parada é alterada para 10^{-3} .

O ponto inicial utilizado para as variáveis primais é $e_k = 1$ e $f_k = 0$, mas as variáveis de folga primais são inicializadas com $s_1 = \max(0.01, h^{\max} - h(x))$ e $s_2 = \max(0.01, h(x) - h^{\min})$ e as demais variáveis (z_1, z_2 e y) com 0.1.



As Tabelas 6 e 7 mostram os resultados obtidos para o sistema BRASIL.

$\sum P^{\max} / \sum P_C$	Métodos		
	PD	PC	PCC
1.10	26	26	17
1.15	24	28	16
1.20	20	35	18

Tabela 6: Iterações - Sistema BRASIL

$\sum P^{\max} / \sum P_C$	Métodos		
	PD	PC	PCC
1.10	80.61	83.30	55.46
1.15	74.39	90.68	52.41
1.20	62.59	113.59	58.99

Tabela 7: Tempo (s) - Sistema BRASIL

Conclusões

Este trabalho apresenta um método preditor-corretor para o fluxo de potência ótimo ativo-reativo. A formulação do problema utilizando coordenadas cartesianas permite que as correções não lineares possam ser aplicadas a todas as restrições do problema e não apenas nas condições otimalidade como é tradicionalmente feito.

Comparando o método preditor-corretor completo (PCC) proposto neste trabalho com o método primal-dual clássico (PD), o método PCC obteve desempenho superior em todos os casos testados, conseguindo um tempo de processamento menor mesmo considerando o maior esforço computacional por iteração.

Na comparação com o método preditor-corretor tradicional (PC), onde o esforço computacional por iteração é praticamente igual, o PCC obteve um desempenho superior na quantidade de iterações. Em alguns casos testados o PC obteve desempenho inferior até mesmo que o PD, devido à falta de correções em todas equações.

O tempo de processamento para os sistemas IEEE é similar, pois os sistemas são considerados de pequeno porte e o custo computacional de cada iteração é baixo. Já em um sistema maior, como o interconectado brasileiro, a diferença é significativa e a utilização do método proposto é vantajosa.

Referências

- Carpentier, J. (1962). Contribution a l'étude du dispatching économique. *Bulletin de la Societe Francaise des Electriciens*, 3:431–447.
- El-Bakry, A. S., Tapia, R. A., Tsuchiya, T., e Zhang, Y. (1996). On the formulation and the theory of the Newton interior-point method for nonlinear programming. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 89:507–541.
- Garzillo, A., Innorta, M., e Ricci, R. (1999). The flexibility of interior point based power flow algorithms facing critical network situations. *Electrical Power & Energy Systems*, 21:579–584.
- Granville, S. (1994). Optimal reactive power dispatch through interior point methods. *IEEE Transactions on Power Systems*, 9(1):136–146.
- Karmarkar, N. (1984). A new polynomial-time algorithm for linear programming. *Combinatorica*, 4(4):373–395.
- Mehrotra, S. (1992). On the implementation of a primal-dual interior point method. *SIAM Journal on Optimization*, 2(4):575–601.
- Momoh, J. A., El-Hawary, M. E., e Adapa, R. (1999a). A review of selected optimal power flow literature to 1993, part I: Nonlinear and quadratic programming approaches. *IEEE Transactions on Power Systems*, 14(1):96–104.
- Momoh, J. A., El-Hawary, M. E., e Adapa, R. (1999b). A review of selected optimal power flow literature to 1993, part II: Newton, linear programming and interior point methods. *IEEE Transactions on Power Systems*, 14(1):105–111.



- Monticelli, A. J. (1983). *Fluxo de Carga Em Redes de Energia Elétrica*. Edgar Blucher, São Paulo.
- Probst, R. W. e Oliveira, A. R. L. (2015). A new predictor–corrector method for optimal power flow. *Optimization and Engineering*, 16(2):335–346.
- Quintana, V. H., Torres, G. L., e Medina-Palomo, J. (2000). Interior point methods and their applications to power systems: A classification of publications and software codes. *IEEE Transactions on Power Systems*, 15(1):170–176.
- Torres, G. L. e Quintana, V. H. (1998). An interior-point method for nonlinear optimal power flow using voltage rectangular coordinates. *IEEE Transactions on Power Systems*, 13:1211–1218.
- Wright, S. J. (1996). *Primal-Dual Interior-Point Methods*. SIAM Publications, Philadelphia.
- Wu, Y. Q., Debs, A. S., e Mastern, R. E. (1994). A direct nonlinear predictor-corrector prima-dual interior point algorithm for optimal power flows. *IEEE Transactions on Power Systems*, 9(2): 876–883.