

FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO EM CORRENTE CONTÍNUA COM AS PERDAS REPRESENTADAS NAS RESTRIÇÕES

Cássio H. Fujisawa, Secundino Soares

UNICAMP

Campinas-SP, Brasil

{cassio; dino}@cose.fee.unicamp.br

Marcus F. Carvalho

PUC-Campinas

Campinas-SP, Brasil

marcius@puc-campinas.edu.br

Anibal T. Azevedo

UNESP

Guaratinguetá-SP, Brasil

anibal@feg.unesp.br

Donato da Silva Filho

Energias de Portugal

São Paulo-SP, Brasil

donato.filho@edpbr.com.br

RESUMO

Este artigo propõe um modelo de fluxo de potência ótimo em corrente contínua que considera as perdas de transmissão diretamente nas equações de balanço de fluxo, representadas como consumo de potência ativa. A função objetivo consiste em minimizar a geração de potência que leve a minimização das perdas de transmissão. As restrições consideram ambas leis de Kirchhoff, de corrente e de tensão. A lei de corrente de Kirchhoff é representada pelas equações não lineares devido a inclusão das perdas de transmissão como função quadrática nas equações de balanço nodal. A lei de tensão de Kirchhoff estabelece que a soma de todas as tensões de um circuito fechado é zero. Esse modelo foi testado em três sistemas de potência: IEEE14BUS, IEEE24BUS e IEEE57BUS. E foi estudado como a realocação da geração de potência ativa pode minimizar as perdas de transmissão. Este estudo foi feito através da variação da flexibilidade do limite de geração.

PALAVRAS-CHAVE: Fluxo de Potência Ótimo em Corrente Contínua, Perdas de Transmissão, Modelo de Fluxo em Redes

Área principal: PO na área de energia (EN).

ABSTRACT

This article proposes a DC optimal power flow model that considers the transmission losses directly in the flow balance equations, thus representing them as active power load. The objective function consists in minimizing the sum of power generation that leads to the minimization of the transmission losses. The constraints consider both the Kirchhoff's current and voltage laws. The Kirchhoff's current law is represented by nonlinear equations through the inclusion of transmission losses as a quadratic function at the node balance equation. The Kirchhoff's voltage law states that the sum of all voltages in a closed circuit is zero. This model was tested with three power systems: IEEE14BUS, IEEE24BUS and IEEE57BUS. And it was studied as the reallocation of the active power generation contributes to minimize the transmission losses. This study was done through the generation bound flexibility variation.

KEYWORDS: DC optimal power flow, Transmission Losses, Network Flow Model

Main area: O. R. Applied to Energy (EN).

1 Introdução

Desde os anos 70, alguns problemas de FPO-CC (também chamado fluxo de potência ativa ótimo) foram formulados utilizando o modelo de fluxo em redes como uma alternativa à abordagem clássica baseada na formulação nodal (Azevedo, Castro, Oliveira & Soares 2009, Garver 1970, Carvalho, Soares & Ohishi 1988, Soares & Salmazo 1997). Diversas foram as aplicações a partir do modelo de fluxo em rede como o estudo de confiabilidade (Sullivan 1977), capacidade de atendimento da carga (Garver 1970, Garver, Horne & Wirgan 1979), despacho econômico (Azevedo et al. 2009, Lee, Thorne & Hill 1980, Carvalho et al. 1988, Oliveira, Soares & Nepomuceno 2003), análise de contingência (Hobson, Fletcher & Stadlin 1984), programação hidrotérmica (Franco, Carvalho & Soares 1994), capacidade de transferência disponível (Tong, Wu & Su 2008) e planejamento da rede de transmissão (Monticelli, Santos, Pereira, Cunha, Parker & Praca 1982, Luo, Hill & Lee 1984, Villasana, Garver & Salon 1985). Uma vantagem da abordagem do fluxo em redes em relação à abordagem clássica CC é que os fluxos de potência são representados explicitamente no modelo. Essa estrutura permite considerar as capacidades de transmissão diretamente como a imposição de limites nas variáveis de transmissão, as perdas como o critério de otimização (Luo et al. 1984, Luo, Hill & Lee 1986, Oliveira et al. 2003), e a adequada representação dos dispositivos FACTS (*flexible ac transmission systems*) (Ge & Chung 1999, Azevedo, Oliveira, Rider & Soares 2010).

A contribuição deste artigo é uma evolução dos modelos propostos na literatura para a representação das perdas no FPO-CC. Esta evolução consiste na consideração direta das perdas de transmissão nas restrições de balanço de carga ao invés da consideração indireta tal como tratado pelas duas representações clássicas:

- (i) **Função objetivo:** a representação das perdas é realizada via função objetivo quadrática.
- (ii) **Sucessivos FPO-CC:** em um primeiro FPO-CC não se consideram perdas, mas estas são contabilizadas a partir da informação de fluxo. Depois as perdas são consideradas como uma injeção de carga nas barras terminais de cada ramo e por fim um novo FPO-CC é executado.

O acoplamento entre as perdas de transmissão e a geração através da restrição de balanço de carga tem como vantagem permitir que a redução dos custos de geração impliquem em uma redução das perdas.

Em um sistema puramente hidráulico (no qual todo gerador tem o mesmo custo de geração), essa função objetivo indiretamente minimiza as perdas de transmissão. Dessa forma, o modelo proposto pode ser usado para analisar a sensibilidade das perdas com a variação dos limites de geração. Este artigo também apresenta um estudo sobre a influência da tolerância do algoritmo e do número de geradores na convergência do problema.

A seguir é descrita a notação de todas as equações, na Seção 2 é modelado o FPO-CC, na Seção 3 são apresentados os resultados e na Seção 4 a conclusão.

Notação

m representa o número de ramos.

n representa o número de barras.

l representa o número de laços.

g representa o número de geradores.

A representa a matriz de incidência da rede ($n \times m$).

L representa a matriz de laço da rede ($l \times m$).

X representa a matriz diagonal de reatância ($m \times m$).

R representa a matriz diagonal de resistência ($m \times m$).

r_i representa a resistência do ramo i (1×1).

B representa a matriz susceptância ($n \times n$).

- p representa o vetor de geração de potência ativa ($g \times 1$).
 d representa o vetor de demanda de potência ativa ($n \times 1$).
 f representa o vetor de fluxo de potência ativa ($m \times 1$).
 f_i representa o fluxo de potência ativa do ramo i (1×1).
 F representa a matriz diagonal do fluxo de potência ativa ($m \times m$).
 $loss_i$ representa a perda de potência ativa do ramo i (1×1).
 φ representa o vetor da defasagem angular ($m \times 1$).
 θ representa o vetor de ângulos ($n \times 1$).
 f_{min} representa o limite inferior do fluxo de potência ativa f .
 f_{max} representa o limite superior do fluxo de potência ativa f .
 p_{min} representa o limite inferior da geração de potência ativa p .
 p_{max} representa o limite superior da geração de potência ativa p .
 α representa a constante de peso.
 ϕ_1 representa a função associada ao vetor de geração.
 $*$ representa o símbolo para valor especificado.

2 Modelagem do FPO-CC

No fluxo de potência CC, a lei de corrente de Kirchhoff (LCK) estabelece a conservação do fluxo de potência nas barras, e pode ser escrita como:

$$Af = p - d \quad (1)$$

A lei de tensão de Kirchhoff (LTK), por sua vez, estabelece que os fluxos de potência dos ramos são definidos pela relação entre as diferenças angulares e suas susceptâncias escrita como:

$$f = X^{-1}A^t\theta \quad (2)$$

A formulação nodal clássica do problema de fluxo de potência CC une ambas as leis em uma única equação linear substituindo a Equação (2) na Equação (1).

$$Af = A(X^{-1}A^t)\theta = B\theta = p - d \quad (3)$$

no qual $B = A(X^{-1}A^t)$ é a matriz susceptância. Portanto, a formulação clássica CC reduz o sistema linear que representa as leis de Kirchhoff na dimensão do número de barras através da eliminação das variáveis dos fluxos de potência dos ramos e expressando as leis de Kirchhoff somente em termos de injeções de potência e variáveis de ângulo das barras.

A formulação nodal traz uma redução considerável na dimensão do sistema linear das leis de Kirchhoff, de $(n + m)$ restrições e $(n + m)$ variáveis nas Equações (1) e (2) para (n) restrições e (n) variáveis na Equação (3). Por esta razão, tem sido amplamente adotada, especialmente em aplicações nas quais o fluxo de potência no ramo ou seus limites não precisam ser conhecidos.

Para aplicações nas quais os fluxos de potência dos ramos precisam ser considerados, restrições lineares adicionais devem ser usadas para as variáveis de fluxo de potência dos ramos sendo calculadas a partir das variáveis de ângulos das barras através da Equação (2). Em outras palavras, LTK é considerada duas vezes pois está presente implicitamente na Equação (3) e explicitamente na restrição linear adicional da Equação (2) (Santos & Diniz 2011).

A formulação nodal do modelo de fluxo de potência CC traz algumas dificuldades para lidar com as variáveis e restrições do fluxo de potência da transmissão, uma vez que não permite expressar as restrições de capacidade das linhas de transmissão diretamente, por serem os fluxos nas linhas resultantes de uma diferença angular. No intuito de superar essas dificuldades, uma abordagem usual é o procedimento de flexibilização pelo qual os limites de transmissão que são violados são progressivamente considerados por meio de iterações *dual simplex*. Obviamente essa abordagem introduz um esforço computacional adicional considerável pois requer um procedimento de solução iterativo com o monitoramento das violações dos fluxos de potência da transmissão a cada iteração (Stott & Hobson 1978).

A manipulação indireta das variáveis de transmissão na formulação nodal do problema de fluxo de potência CC também constitui uma dificuldade para representar os dispositivos FACTS.

Na abordagem apresentada neste artigo, o problema de fluxo de potência CC é formulado através da abordagem de fluxo em redes no qual as leis de Kirchhoff são expressadas como o conjunto de equações lineares:

$$Af = p - d \quad (4)$$

$$LXf = 0 \quad (5)$$

A Equação (4) assegura LCK pois ela reproduz a Equação (1). A Equação (5) assegura LTK pois ela resulta da pré multiplicação da Equação (2) pela matriz LX . Note que

$$LXf = LXX^{-1}A'\theta = LA'\theta = 0 \quad (6)$$

sendo $LA'\theta$ as somas das diferenças angulares para todos os laços básicos tal que é igual a zero. A Equação (5) expressa esta condição em termos da variável de fluxo de potência ativa f (Carvalho et al. 1988).

O uso explícito da variável f , como na formulação da LTK na Equação (5), é uma vantagem para a consideração dos limites do fluxo de potência no modelo de fluxo de potência ótimo CC.

Outra vantagem da Equação (5) sobre a Equação (2) é a redução do número de equações necessárias para representar a LTK, pois a primeira depende do número de laços básicos ($l = n - m + 1$) e a segunda depende do número de ramos (m), respectivamente. Portanto, a abordagem de fluxo em redes dada pelas Equações (4)-(5) é mais compacta do que as Equações originais (1)-(2) pois essa considera a LTK somente nos ramos que pertencem aos laços.

Procedimentos eficientes para encontrar a matriz de laço L a partir da matriz incidência A são discutidos em (Oliveira et al. 2003, Expósito, Ramos & Godino 2006), sendo a proposta descrita em (Oliveira et al. 2003) adotada neste artigo. É importante notar que, apesar de ser trabalhosa a identificação do conjunto das equações de laço em um sistema de larga escala, essa tarefa precisa ser feita apenas uma vez para uma determinada configuração de rede.

Perdas de Transmissão

Neste artigo é proposta a inclusão das perdas de transmissão nas equações de restrição. Na Equação (7) são representadas as perdas em cada ramo de transmissão.

$$loss_i = r_i \cdot f_i^2 \quad (7)$$

As perdas de transmissão dadas pela Equação (7) poderiam unir-se a Equação (4), pois as perdas podem ser representadas como cargas. Então, a forma matricial da Equação (7) combinada com a Equação (4) produzirá a Equação (8).

$$(A + \frac{1}{2}|A|RF)f - p = -d \tag{8}$$

no qual R é a matriz diagonal cujos valores R_{ij} correspondem à resistência relacionada ao valor de fluxo de potência F_{ij} da matriz diagonal F . Cada valor F_{ij} está relacionado com a variável f_i do vetor das variáveis de fluxo de potência f . A Equação (8) é a versão matricial do balanço de potência nos nós considerando as perdas que são calculadas para cada ramo de transmissão e divididas entre as duas barras terminais desse ramo. Como consequência da Equação (8) as perdas são consideradas diretamente na LCK.

2.1 Exemplo

Um sistema de 5 barras ilustra as equações de restrição do modelo de fluxo em redes cujas gerações de potência ativa são tomadas como variáveis de decisão. A Figura 1 apresenta o diagrama unifilar e a Figura 2 apresenta o grafo correspondente a essa rede com dois laços básicos.

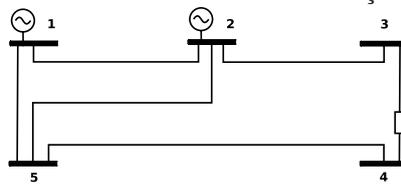


Figura 1: Diagrama unifilar.

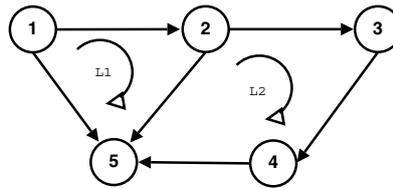


Figura 2: Grafo equivalente.

A partir do grafo da Figura 2, e isolando todas as variáveis de decisão no lado esquerdo, as restrições (8) e (5) podem ser reescritas como:

$$\left\{ \begin{array}{cccccc|cc} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ \hline x_{12} & -x_{15} & 0 & x_{25} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_{23} & -x_{25} & x_{34} & x_{45} & 0 & 0 \end{array} \right. + \frac{1}{2} \cdot \left\{ \begin{array}{cccccc|cc} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right. \cdot \left\{ \begin{array}{cccccc|cc} r_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_{15} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_{25} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_{34} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{45} & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right. \cdot \left\{ \begin{array}{cccccc|cc} f_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_{15} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & f_{25} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & f_{34} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & f_{45} & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right\}$$

$$\begin{bmatrix} f_{12} \\ f_{15} \\ f_{23} \\ f_{25} \\ f_{34} \\ f_{45} \\ p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -d_1 \\ -d_2 \\ -d_3 \\ -d_4 \\ -d_5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

2.2 FPO-CC pelo Modelo de Fluxo em Redes

O problema de fluxo de potência ótimo CC com perdas pode então ser formulado com o seguinte modelo de fluxo em redes com limites e com restrições não lineares adicionais:

$$\text{Min} \quad \phi_1(p) \quad (10)$$

$$\text{St} \quad (A + \frac{1}{2}|A|RF)f - p = -d \quad (11)$$

$$LXf = 0 \quad (12)$$

$$f_{min} \leq f \leq f_{max} \quad (13)$$

$$p_{min} \leq p \leq p_{max} \quad (14)$$

A função objetivo (10) é o critério $\phi_1(p)$ dependente das gerações de potência. $\phi_1(p)$ pode ser representada por uma função quadrática separável expressa por:

$$\phi_1(p) = \frac{1}{2}p^t N_1 p + n_2^t p + n_3 \quad (15)$$

na qual N_1 , n_2 e n_3 são os parâmetros dados pela matriz diagonal, vetor e escalar, respectivamente. Ajustando apropriadamente os valores de N_1 , n_2 e n_3 , a função $\phi_1(p)$ pode representar os custos quadráticos de geração.

Neste artigo a função objetivo escolhida foi $\phi_1(p) = p$, na qual $N_1 = 0$, n_2 é um vetor de 1 e $n_3 = 0$. Esta função objetivo busca a minimização da geração de potência ativa que atende uma demanda especificada mais as perdas nas linhas de transmissão, representadas como potências ativas consumidas. Uma vez determinada a configuração de potência ativa gerada mínima, as perdas de transmissão serão mínimas, pois os custos de geração apresentam pesos iguais.

3 Resultados Numéricos

Esta seção apresenta testes feitos com o modelo proposto de fluxo de potência ótimo em corrente contínua aplicado em três sistemas de potência: IEEE24BUS (Albrecht, Bhavaraju, Biggerstaff, Billinton, Jorgensen, Reppen & Shortley 1979), IEEE14BUS e IEEE57BUS (Christie 1993). O IEEE14BUS é composto por 14 barras incluindo 2 geradores. O IEEE24BUS é composto por 24 barras incluindo 10 geradores. E o IEEE57BUS é composto por 57 barras incluindo 4 geradores.

As demandas dos sistemas IEEE24BUS e IEEE57BUS foram aumentadas para enfatizar as vantagens desse modelo e para obter resultados que são mais próximos ao comportamento de sistemas reais cujas perdas de transmissão são em torno de 5%. Esse ajuste nas perdas de transmissão requer um novo perfil de geração chamado de valor base. A geração original, sem alterações na demanda, do sistema IEEE14BUS é também chamado de valor base.

Para cada um dos sistemas quatro casos são elaborados para testar esse modelo. No primeiro caso, caso de referência, os sistemas têm suas gerações fixadas no valor base, os outros casos são derivados

desse caso de referência.

No segundo caso a geração de potência de cada sistema tem flexibilidade para variar de um limite inferior até um limite superior. O limite inferior é 5% menor do que o valor base e o limite superior é 5% maior do que o valor base.

O terceiro caso é similar ao caso anterior sendo o limite inferior de geração estipulado em 10% menor do que o valor base e o limite superior 10% maior do que o valor base.

E no quarto caso os sistemas têm o limite inferior de geração igual a zero e o limite superior ilimitado.

Como exemplo, a Tabela 1 mostra os limites de geração de cada caso para o sistema IEEE57BUS. Esse sistema tem quatro geradores chamados G1, G2, G3 e G4. Os limites superior e inferior de cada gerador é dado em MW.

		G1 [MW]	G2 [MW]	G3 [MW]	G4 [MW]
Caso 1	p	1301.25	100.00	1125.00	775.00
Caso 2	p_{max}	1366.31	105.00	1181.25	813.75
	p_{min}	1236.19	95.00	1068.75	736.25
Caso 3	p_{max}	1431.38	110.00	1237.50	852.50
	p_{min}	1171.13	90.00	1012.50	697.50
Caso 4	p_{max}	∞	∞	∞	∞
	p_{min}	0	0	0	0

Tabela 1: Sistema IEEE57BUS: Limites de geração de cada caso.

Na próxima subseção é apresentada a influência da flexibilização dos limites de geração nas perdas de transmissão do sistema. E as duas últimas subseções mostram dois aspectos do algoritmo que impactam no seu desempenho: a tolerância na convergência e o número de geradores.

Todos os testes são feitos utilizando o programa computacional MATLABTM, especialmente o comando “fmincon” que resolve problemas de otimização com restrições não lineares. Mais detalhes sobre esse comando encontram-se em (Azevedo, Oliveira & Soares 2008). Para essa função foi escolhido o algoritmo *Interior Point*, e o ponto inicial foi zero para todas as variáveis. As características do computador utilizado são Intel Pentium 4 CPU 3,60GHz, 2GB de RAM, sistema operacional de 64 bits e Windows 7. O tempo computacional gasto para executar o comando “fmincon” nos sistemas IEEE24BUS e IEEE57BUS foram de 2,0 a 2,8 segundos, e para o sistema IEEE14BUS foi em torno de 0,3 segundo. Os demais procedimentos como por exemplo: leitura dos dados e criação das matrizes, gastam entre 1 a 2 segundos.

3.1 Perdas de Transmissão do Sistema

As perdas de transmissão do sistema são resultantes da combinação de duas variáveis: os parâmetros da linha de transmissão e o fluxo de potência dessas linhas. A primeira variável é a característica da linha que é fixa e a segunda, depende do estado de operação do sistema. Portanto, para reduzir as perdas de transmissão sem trocar as linhas de transmissão a única maneira possível é modificando os dispositivos de controle do sistema que determinam o estado de operação. Este artigo analisa a realocação da geração de potência ativa como uma política de minimização de perdas.

A Figura 3 mostra as perdas de transmissão do sistema IEEE57BUS relacionadas a flexibilidade dos limites de geração, variando de uma situação com os limites inflexíveis (caso 1) para uma com os limites totalmente flexíveis (caso 4). A partir da Figura 3 pode ser vista a variação das perdas de 174.25 MW até a perda mínima de 75.46 MW, possível pela flexibilização da geração de potência. O valor de 89.1% de flexibilização de geração permite a redução das perdas para 80 MW, um valor muito próximo do mínimo. A partir deste ponto as perdas começam a decrescer lentamente. Nesta figura também é possível ver o perfil desta curva.

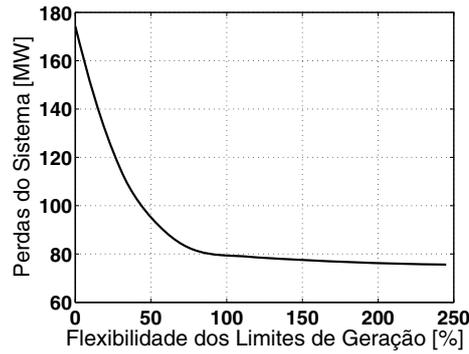


Figura 3: Perdas de transmissão do sistema IEEE57BUS

A Figura 4 e a Tabela 2 mostram os geradores do mesmo sistema IEEE57BUS, e sua respectiva quantidade de potência gerada para os quatro casos testados. É possível ver o comportamento de cada gerador quando se almeja a redução de perdas. No caso 1 todos os quatro geradores têm suas gerações de potência ativa fixada no valor base. Nos casos 2 e 3 os geradores podem variar 5% e 10% acima ou abaixo do valor base, respectivamente, como resultado, G1 decresce até atingir seu limite inferior enquanto G2 e G4 aumentam até os seus limites superiores, e G3 somente aumenta, não variando significativamente. O caso 4 analisa o melhor despacho de geração para a minimização de perdas, no qual o limite inferior de geração é ajustado em zero e o limite superior é deixado aberto. Neste cenário é identificado que G4 controla melhor as perdas do sistema de potência para a distribuição de carga proposta.

Depois de todos esses resultados é possível ver uma tendência dos geradores G1, G2 e G4 no sentido de minimização das perdas, o primeiro tende a reduzir e os dois últimos tendem a aumentar. E G3 não tem uma tendência, ele varia conforme o caso.

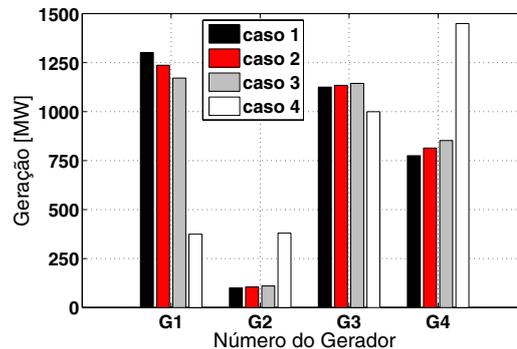


Figura 4: Distribuição de geração.

	G1 [MW]	G2 [MW]	G3 [MW]	G4 [MW]
Caso 1	1301.25	100.00	1125.00	775.00
Caso 2	1236.19	105.00	1134.03	813.75
Caso 3	1171.13	110.00	1143.97	852.50
Caso 4	374.54	379.33	999.44	1449.15

Tabela 2: Sistema IEEE57BUS: Geração de cada caso.

A Tabela 3 mostra as perdas de transmissão de cada sistema relacionado com a flexibilidade dos limites de geração. É dividida em três grupos correspondendo aos três sistemas distintos. Na primeira linha é exibida a perda total de transmissão em MW. Na segunda e terceira linha é mostrada a redução de perda em MW e porcentagem, respectivamente, tomando como base as perdas obtidas no caso 1.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
IEEE 14 BUS				
perda total	14.27MW	14.15MW	14.04MW	9.17MW
redução das perdas	-	0.12MW 0.81%	0.23MW 1.61%	5.10MW 35.72%
IEEE 24 BUS				
perda total	580.29MW	554.38MW	536.04MW	499.57MW
redução das perdas	-	25.91MW 4.47%	44.25MW 7.63%	80.72MW 13.91%
IEEE 57 BUS				
perda total	174.25MW	161.96MW	150.59MW	75.46MW
redução das perdas	-	12.29MW 7.05%	23.65MW 13.57%	98.79MW 56.70%

Tabela 3: Flexibilidade nos limites de geração.

A partir da Tabela 3 é possível observar que todos os três sistemas têm as perdas de transmissão reduzidas quando os limites de geração aumentam. Isso significa que o modelo matemático com um maior grau de liberdade despacha os geradores com o intuito de minimizar as perdas de transmissão quando as perdas são impostas como restrições. Do ponto de vista do operador do sistema, é possível identificar onde é a melhor alocação de geração de potência objetivando a redução de perdas de transmissão quando há flexibilização de geração.

3.2 Tolerância na Convergência

Existem dois tipos de tolerância no algoritmo escolhido:

- **Tolerância na violação da restrição:** em cada passo do processo de otimização, é determinado se existe uma violação da restrição cujo valor absoluto seja maior do que um definido valor (*TolCon* no Matlab). Se todas as condições de saída são satisfeitas, e se a maior violação for menor do que o valor definido, então a otimização termina de forma bem sucedida;
- **Tolerância de término no valor da função:** no processo de otimização, é verificado se a função objetivo muda menos do que um determinado valor (*TolFun* no Matlab), se isso ocorrer e se as outras condições de saída estiverem satisfeitas, então a otimização termina de forma bem sucedida.

Nesta subseção foi testada como a variação da tolerância de violação da restrição e função influencia na convergência do problema. Para este teste ambas tolerâncias foram variadas no mesmo valor, então analisou-se a redução do número de iterações e o erro da solução obtida. Foi usado como solução referência o caso com o valor da tolerância ajustado em 10^{-8} . Para calcular o erro, foi usada a Equação (16):

$$Erro = \sum_{i=1}^n |x^*(i) - x(i)| \quad (16)$$

no qual x é o vetor da solução que está sendo testado, com n variáveis, x^* é o vetor da solução referência e i é o índice do vetor.

A Tabela 4 foi dividida em três grupos, que são os três sistemas teste, e cada um teve o valor da tolerância variado de 10^{-6} até 10^{-3} . Os resultados foram escritos nas colunas 3 e 4, que são respectivamente o número necessário de iterações para se atingir a convergência e o erro da solução. Somente o caso 3, que tem os limites de geração ajustados em 10% do valor de referência, foi testado.

Sistema	Tolerância	Iterações	Erro [MW]
IEEE14BUS	10^{-6}	7	$5 \cdot 10^{-6}$
	10^{-5}	6	$1 \cdot 10^{-2}$
	10^{-4}	4	$2 \cdot 10^{-2}$
	10^{-3}	4	$2 \cdot 10^{-2}$
IEEE24BUS	10^{-6}	35	$4 \cdot 10^{-2}$
	10^{-5}	33	$2 \cdot 10^{-1}$
	10^{-4}	31	$3 \cdot 10^0$
	10^{-3}	28	$8 \cdot 10^1$
IEEE57BUS	10^{-6}	14	$6 \cdot 10^{-3}$
	10^{-5}	14	$6 \cdot 10^{-3}$
	10^{-4}	11	$7 \cdot 10^{-1}$
	10^{-3}	10	$3 \cdot 10^0$

Tabela 4: Influência da tolerância na convergência.

A partir da Tabela 4, é possível observar o número de iterações decresce e o erro da solução aumenta quando o valor da tolerância aumenta. Portanto, de acordo com a precisão desejada e as características do sistema, será definida a tolerância adequada.

3.3 Número de Geradores

Nesta subseção é testada e analisada a relação do número de geradores com a convergência do problema. O número de iterações para obter a solução foi utilizado como indicador para convergência do problema.

A Tabela 5 mostra os três sistemas testados usando a tolerância do algoritmo em 10^{-6} para os quatro casos. Além disso, a Tabela 5 exhibe o número de geradores de cada sistema e o número necessário de iterações para cada caso testado.

Sistema	Número de geradores	Número do caso	Iterações
IEEE14BUS	2	Caso 1	3
		Caso 2	7
		Caso 3	7
		Caso 4	9
IEEE24BUS	10	Caso 1	41
		Caso 2	39
		Caso 3	35
		Caso 4	37
IEEE57BUS	4	Caso 1	12
		Caso 2	10
		Caso 3	14
		Caso 4	20

Tabela 5: Número de geradores relacionado ao número de iterações.

A partir da Tabela 5, é possível observar que o sistema IEEE14BUS precisou de 3 a 9 iterações para convergir, o sistema IEEE24BUS precisou de 35 a 41 iterações e o sistema IEEE57BUS precisou de 10 a 20 iterações. Portanto, a convergência do problema está mais relacionada ao número de barras de geração que ao tamanho do sistema. Isto é evidenciado uma vez que o sistema IEEE24BUS, que é menor do que o IEEE57BUS, e precisou de mais iterações para convergir.

4 Conclusão

O modelo de FPO-CC proposto neste artigo considera as perdas de transmissão como cargas adicionais na equação de balanço de potência nos nós. Para a função objetivo escolhida de minimização da potência total gerada que apresenta custos iguais entre os geradores, quando se obtém a geração mínima é obtida indiretamente a minimização das perdas de transmissão.

Os testes feitos com os três sistemas de potência possibilitaram analisar a influência da geração nas perdas de transmissão. Os resultados mostraram que a flexibilidade nos limites de geração podem reduzir as perdas de transmissão. Além disso, o teste sem os limites de geração mostrou qual é a melhor barra geradora para se alocar a geração com o intuito de reduzir as perdas.

Os outros testes foram feitos para analisar a convergência do problema, primeiramente foi testado a tolerância do algoritmo, e em seguida, a influência do número de geradores. A partir do primeiro teste foi possível ver que a tolerância pode reduzir o número de iterações tornando a convergência mais rápida, mas também aumenta o erro. No segundo teste foi observado que o aumento do número de iterações está mais relacionado com o número de geradores do que com o tamanho do sistema.

Referências

- Albrecht, P. F., Bhavaraju, M. P., Biggerstaff, B. E., Billinton, R., Jorgensen, G. E., Reppen, N. D. & Shortley, P. B. (1979), 'IEEE reliability test system.', *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. PAS-98 **6**, 2047–2054.
- Azevedo, A., Castro, C., Oliveira, A. & Soares, S. (2009), 'Security constrained optimal active power flow via network model and interior point method.', *SBA Controle & Automação* **20**(2), 206–216.
- Azevedo, A., Oliveira, A., Rider, M. & Soares, S. (2010), 'How to efficiently incorporate facts devices in optimal active power flow model.', *Journal of Industrial and Management Optimization* **6**(2), 315–331.
- Azevedo, A., Oliveira, A. & Soares, S. (2008), 'Interior point method for long-term generation scheduling of large-scale hydrothermal systems.', *Annals of Operations Research* pp. 55–80.
- Carvalho, M., Soares, S. & Ohishi, T. (1988), 'Optimal active power dispatch by network flow approach.', *IEEE Transactions on Power Systems* **3**(4), 1640–1647.
- Christie, R. D. (1993), *Power Systems Test Case Archive*. <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/> (acessado em 29 de abril de 2011).
- Expósito, A. G., Ramos, E. R. & Godino, M. D. (2006), 'Two algorithms for obtaining sparse loop matrices.', *IEEE Transactions on Power Systems* **21**(1), 125–131.
- Franco, P., Carvalho, M. & Soares, S. (1994), 'A network flow model for short-term hydro-dominated hydrothermal scheduling problem.', *IEEE Transactions on Power Systems* **9**, 1016–1021.
- Garver, L. L. (1970), 'Transmission network estimation using linear programming.', *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. PAS-89 pp. 1688–1696.
- Garver, L. L., Horne, P. R. V. & Wirgan, K. A. (1979), 'Load supplying capability of generation - transmission systems.', *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. PAS-98 pp. 957–962.
- Ge, S. Y. & Chung, T. S. (1999), 'Optimal active power flow incorporating power flow control needs in flexible ac transmission systems.', *IEEE Transactions on Power Systems* **14**, 738–744.
- Hobson, E., Fletcher, D. L. & Stadlin, W. O. (1984), 'Network flow linear programming and their application to fuel scheduling and contingency analysis.', *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. PAS-109 pp. 1684–1691.
- Lee, T. H., Thorne, D. H. & Hill, E. F. (1980), 'A transportation method for economic dispatching - applications and comparison.', *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. PAS-99 pp. 2373–2385.

- Luo, J. S., Hill, E. F. & Lee, T. H. (1984), 'Power system economic dispatch via network approach.', *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. PAS-101* pp. 1242–1248.
- Luo, J. S., Hill, E. F. & Lee, T. H. (1986), 'Bus incremental costs and economic dispatch.', *IEEE Transactions on Power Systems* **1**(1), 161–167.
- Monticelli, A. J., Santos, A., Pereira, M. V. F., Cunha, S. H., Parker, B. J. & Praca, J. C. (1982), 'Iterative transmission network planning using a least-effort criterion.', *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. PAS-10* pp. 3919–3925.
- Oliveira, A. R. L., Soares, S. & Nepomuceno, L. (2003), 'Optimal active power dispatch combining network flow and interior point approaches.', *IEEE Transactions on Power Systems* **18**(4), 1235–1240.
- Santos, T. & Diniz, A. (2011), 'A dynamic piecewise linear model for dc transmission losses in optimal scheduling problems.', *IEEE Transactions on Power Systems* **26**(2), 508–519.
- Soares, S. & Salmazo, C. T. (1997), 'Minimum loss predispatch model for hydroelectric systems.', *IEEE Transactions on Power Systems* **12**, 1220–1228.
- Stott, B. & Hobson, E. (1978), 'Power system security control calculations using linear programming, part i.', *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. PAS-97* **5**, 1713–1720.
- Sullivan, R. L. (1977), *Power System Planning*, McGraw-Hill, Inc., New York.
- Tong, X., Wu, F. F. & Su, J. (2008), 'Quadratic approximation and visualization of online contract-based available transfer capability region of power systems.', *Journal of Industrial and Management Optimization* **4**(3), 553–563.
- Villasana, R., Garver, L. L. & Salon, S. J. (1985), 'Transmission network planning using linear programming.', *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. PAS-104* pp. 349–356.