

Modelo Matemático para Fluxo de Potência Ótimo Considerando o FACTS Interline Power Flow Controller

Elenilson de Vargas Fortes
Departamento de Áreas Acadêmicas
Instituto Federal de Goiás
Jataí, Goiás 75804 – 020
elenilson.fortes@ifg.edu.br
Telefone: (64) 3632 – 8600

Percival Bueno de Araujo, Leonardo H. Macedo
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Estadual Paulista
Ilha Solteira, São Paulo 15385 – 000
percival@dee.feis.unesp.br, leohfmp@gmail.com
Telefone: (18) 3743 – 1000

Luís Fabiano Barone Martins
Departamento de Eletromecânica
Instituto Federal do Paraná
Jacarezinho, Paraná 86400 – 000
luis.martins@ifpr.edu.br
Telefone: (43) 2122 – 0100

Resumo—Neste trabalho é apresentado um modelo matemático para o cálculo do fluxo de potência ótimo (FPO) considerando a atuação do FACTS *Interline Power Flow Controller* (IPFC). As equações de operação do dispositivo IPFC são incluídas no modelo de programação não linear do FPO em sistemas de transmissão. O objetivo considerado é a redução das perdas, e espera-se que a inclusão do IPFC melhore a operação do sistema, aliviando congestionamento nas linhas. O modelo matemático foi implementado em linguagem de programação matemática AMPL e resolvido com o solver IPOPT. Foram realizados testes em uma versão modificada do sistema de 10 barras disponível na literatura. Os resultados demonstraram que o IPFC atuou melhorando a operação do sistema.

Keywords—Fluxo de potência ótimo, FACTS, *Interline Power Flow Controller*.

I. INTRODUÇÃO

Os primeiros sistemas elétricos de potência (SEPs) eram pequenos e não estavam interligados. Em vista disso, não apresentavam grande complexidade, pois possuíam poucas interconexões. Atualmente o cenário é outro e a cada dia há um aumento da demanda por eletricidade. A princípio, a construção de novas unidades geradoras poderia resolver o problema da demanda. Entretanto, os altos custos envolvidos na expansão do sistema elétrico, tais como construção de novas usinas e linhas de transmissão, e também as restrições ambientais, inviabilizam na maioria dos casos esta expansão.

Por outro lado, deve-se levar em consideração que o gerenciamento da energia e operação dos SEPs é uma tarefa muito difícil e complexa, requerendo um planejamento antecipado e bem executado. Tal complexidade do planejamento e operação de um SEP se deve, em grande parte, a problemas relacionados com a rede de transmissão, já que grande parte das linhas de transmissão estão sujeitas a limites térmicos ou de estabilidade, podendo ocasionar restrições no nível de potência que pode ser transmitido com segurança em determinadas linhas de transmissão [1].

Com tais restrições, tornou-se necessário o desenvolvimento de dispositivos que pudessem controlar os fluxos de potência em determinadas linhas de um sistema elétrico. Neste contexto, e com o desenvolvimento da eletrônica de potência, novos dispositivos automáticos de compensação foram sendo incorporados aos SEPs com o objetivo de melhorar o controle e torná-los mais flexíveis e seguros.

Em especial, na transmissão de energia elétrica, se destacam os *Flexible AC Transmission System* (FACTS) [1], [2], [3]. Esses dispositivos tornaram menos rígidos os sistemas de transmissão (invariabilidade de seus parâmetros), permitindo aumentar a capacidade de transferência de potência nos sistemas já existentes. Dependendo do tipo de FACTS é possível o controle contínuo dos fluxos de potência (ativa e reativa) em locais específicos dos sistemas de transmissão e uma melhora significativa (nas proximidades de sua instalação) dos problemas referentes aos níveis de tensão dos SEPs [4]. Contudo, os FACTS devem ser tratados sempre como alternativa na tentativa de se tentar suprir o aumento da demanda por energia, maximizando o potencial elétrico já instalado, controlando o fluxo de potência já existente [5], [6].

Além de realizar o controle do fluxo de potência, é importante destacar outras características que estes dispositivos possuem. Dentre elas, podem-se citar: melhoramento na eficiência da transmissão das linhas já existentes no SEP; realocar e controlar o fluxo de potência em pontos estratégicos em determinadas linhas de transmissão; controle de reativos e estabilidade de tensão e ângulo [7].

É comum classificar os dispositivos FACTS, segundo [6], em quatro gerações: Na primeira geração estão os dispositivos comutados por tiristores e podem estar tanto ligados em derivação ou em série com suas respectivas linhas de transmissão. Destacam nessa geração os FACTS *Static Var Compensator* (SVC) [6] e o *Thyristor Controlled Series Compensator* (TCSC) [1], [8]; Na segunda geração encontram-se os comutados por transistores que utilizam a tecnologia *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT) ou *Gate Turn Off Thyristor* (GTO). Nesta geração destacam-se o *Static Synchronous Shunt Compensator* (STATCOM) [6], o qual está conectado em derivação com a rede de transmissão e o compensador série *Static Synchronous Series Compensator* (SSSC) [6]; A terceira geração é formada por FACTS que integram na mesma linha de transmissão, dispositivos série e em derivação. Nesta geração pode ser citado o *Unified Power Flow Controller* (UPFC) [6], formado a partir da combinação do SSSC e do STATCOM; Na quarta geração, encontram-se os FACTS que realizam compensação série e em derivação em linhas de transmissão distintas. Nesta categoria está o *Interline Power Flow Controller* (IPFC) [5], que pode ser representado a partir da combinação de dois ou mais SSSCs e o *Generalized Power Flow Controller* (GUPFC) [9], [4] representado a partir da combinação de um IPFC com um STATCOM.

Dentre os diversos FACTS existentes, neste trabalho o interesse é o IPFC. Dentre as características deste dispositivo, destaca-se o fato de que este é capaz de gerenciar fluxos de potência (ativa e reativa) em distintas linhas de transmissão do SEP, podendo reduzir as sobrecargas de transmissão de potência e melhorar no perfil de tensão em determinadas barras do SEP. Mais detalhes sobre este dispositivo serão apresentados na próxima seção.

O ajuste ótimo dos parâmetros do IPFC, de modo a garantir a operação do sistema dentro de seus limites, pode ser feito resolvendo-se um problema de fluxo de potência ótimo (FPO). O FPO é um problema clássico e muito estudado na área de sistemas de energia elétrica. O objetivo é encontrar os valores das variáveis de decisão de forma a minimizar um objetivo, como exemplo, as perdas no sistema ou o custo de geração, garantindo a operação adequada do sistema. As variáveis de decisão nesse problema incluem: tensão e geração de potência ativa nos geradores, posição do *tap* dos transformadores e estado de operação dos *shunts*.

As principais contribuições deste trabalho são: a) modelo completo de FPO com a inclusão do IPFC, para ser resolvido utilizando-se *solvers* de otimização e; b) análise da capacidade do IPFC em aliviar congestionamentos no sistema.

II. MODELO MATEMÁTICO DO IPFC

A. Circuito Equivalente

O IPFC faz parte da quarta geração dos dispositivos FACTS e foi proposto inicialmente em [5]. O IPFC faz uso da tecnologia Conversor Fonte de Tensão (VSC) e combina dois ou mais compensadores série estático síncronos (SS-SCs) independentes os quais estão acoplados via um elo CC comum, possibilitando o fluxo bidirecional de potência ativa entre os seus terminais. Cada conversor do IPFC (VSC) é capaz de gerar uma tensão síncrona controlável em magnitude e ângulo de fase que é conectada às linhas gerenciadas por meio de transformadores de acoplamento [10]. Desta forma, com esta combinação, pode-se de forma simultânea (ou seletiva), controlar os parâmetros que definem os fluxos de potência nas linhas de transmissão (controle da tensão e dos ângulos dos barramentos do SEP, por exemplo). Por simplicidade, é ilustrado na Fig. 1 um IPFC em sua configuração mais básica, ou seja, considera-se o dispositivo dotado de dois conversores séries (VSC) com duas linhas de transmissão.

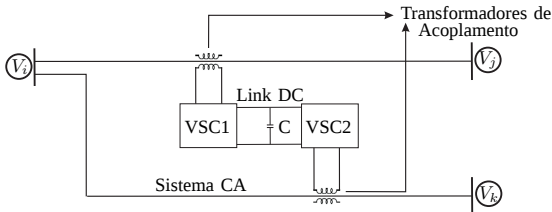


Figura 1. Representação de um IPFC com dois conversores série.

Um modelo do circuito equivalente para o IPFC equipado com dois VSCs é apresentado na Fig. 2.

Na Fig. 2, b_{in} ($n = j, k$) são as susceptâncias de acoplamento dos transformadores em série com suas respectivas linhas de transmissão, enquanto que P_i e Q_i representam as potências ativa e reativa transmitidas pelos ramos comuns a instalação do IPFC, deixando a barra i . P_{ji} e Q_{ji} são os fluxos de potências ativa e reativa (deixando a barra j) do ramo comum de instalação do IPFC. Analogamente, P_{ki} e

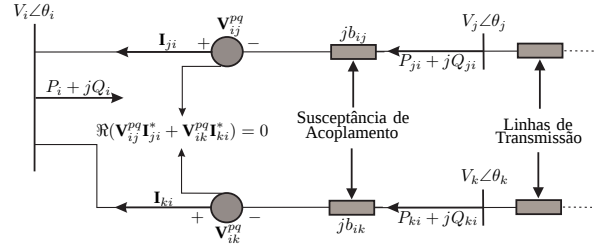


Figura 2. Circuito equivalente de um IPFC com dois conversores série.

Q_{ki} indicam os fluxos de potência ativa e reativa deixando a barra k (comum de instalação do IPFC), I_{ji} e I_{ki} designam as correntes entrando na barra i .

O IPFC, ilustrado na Fig. 2, encontra-se representado pelas fontes de tensão síncronas V_{ij}^{pq} e V_{ik}^{pq} . Estas são responsáveis por injetar uma tensão controlável série, atuando no controle dos fluxos de potência (ativa e reativa) nas linhas de transmissão em que o IPFC encontra-se instalado. Tal procedimento é realizado por meio do controle da magnitude e do ângulo da tensão série injetada (V_{in}^{pq} , $n = j, k$), representado em (1).

$$V_{in}^{pq} = V_{in}^{pq} \angle \gamma_{in} \quad (1)$$

Em (1), V_{in}^{pq} ($n = j, k$) representa os fasor da fonte de tensão série injetada tal como fora referendada na Fig. 2. Além disso, γ_{in} ($-\pi \leq \gamma_{in} \leq \pi$) e V_{in}^{pq} ($V_{in}^{pq} \leq V_{in}^{pq} \leq \bar{V}_{in}^{pq}$) são parâmetros das tensões séries injetadas [11], [12], [13].

As correntes I_{ji} e I_{ki} mostradas na Fig. 2 podem ser expressas por (2).

$$I_{ni} = [V_n - (V_i - V_{in}^{pq})] b_{in} \quad (2)$$

Assumindo-se que as perdas ativas são nulas, tem-se que a potência ativa fornecida por um dos conversores (VSC1) será sempre igual à demanda de potência ativa do outro (VSC2), logo tem-se (3). Essa restrição também é conhecida como Invariância de Potência Ativa do IPFC [14].

$$\Re(V_{ij}^{pq} I_{ji}^* + V_{ik}^{pq} I_{ki}^*) = 0 \quad (3)$$

De acordo com [11], (3) pode ser rescrita como (4), substituindo-se (1) e (2) em (3).

$$\sum_{n=j,k} V_{in}^{pq} b_{in} [V_i \sin(\theta_i - \gamma_{in}) - V_n \sin(\theta_n - \gamma_{in})] = 0 \quad (4)$$

Baseado no circuito equivalente (Fig. 2) é possível deduzir as equações de fluxo de potência para o IPFC (5)–(8), sendo P_i e Q_i os fluxos de potência ativa e reativa deixando a barra i , enquanto que P_{ni} e Q_{ni} ($n = j, k$) representam os fluxos de potência deixando as barras j e k .

$$\begin{aligned} P_i &= -V_i \sum_{n=j,k} V_n b_{in} \sin(\theta_{in}) \\ &\quad - \underbrace{V_i \sum_{n=j,k} V_{in}^{pq} b_{in} \sin(\theta_i - \gamma_{in})}_{\text{IPFC } (P_i^{inj})} \end{aligned} \quad (5)$$

$$Q_i = -V_i^2 b_{ii} + V_i \sum_{n=j,k} V_n b_{in} \cos(\theta_{in}) + \underbrace{V_i \sum_{n=j,k} V_{in}^{pq} b_{in} \cos(\theta_i - \gamma_{in})}_{\text{IPFC } (Q_i^{inj})} \quad (6)$$

$$P_{ni} = -V_i V_n b_{in} \sin(\theta_{ni}) + \underbrace{V_n V_{in}^{pq} b_{in} \sin(\theta_n - \gamma_{in})}_{\text{IPFC } (P_n^{inj})} \quad (7)$$

$$Q_{ni} = -V_n^2 b_{nn} + V_i V_n b_{in} \cos(\theta_{ni}) - \underbrace{V_n V_{in}^{pq} b_{in} \cos(\theta_n - \gamma_{in})}_{\text{IPFC } (Q_n^{inj})} \quad (8)$$

Em (5)–(8), $n = j, k$, $\theta_{in} = \theta_i - \theta_n$, $\theta_{ni} = \theta_n - \theta_i$ e $b_{ii} = \sum_{n=j,k} b_{in}$. A parte sublinhada com a descrição “IPFC” se refere à contribuição do dispositivo no fluxo de potência no ramo de instalação. Assim, estas parcelas são injeções de potência formadas pelo dispositivo nas barras de instalação (P_i^{inj} , Q_i^{inj} , P_n^{inj} e Q_n^{inj} , para $n = j, k$). Estas potências possibilitam representar o IPFC por um modelo de injeção de potências (Fig. 3).

B. Modelo de Injeção de Potência do IPFC

Definidas as injeções de potência conforme (5)–(8) nas barras comuns ao IPFC, pode-se representar o modelo de injeção de potência para este dispositivo conforme a Fig. 3, sendo que as equações de injeções de potência para o IPFC, em cada barra comum a instalação, podem ser representadas por (9)–(12), em que $n = j, k$.

$$P_i^{inj} = V_i \sum_{n=j,k} V_{in}^{pq} b_{in} \sin(\theta_i - \gamma_{in}) \quad (9)$$

$$Q_i^{inj} = -V_i \sum_{n=j,k} V_{in}^{pq} b_{in} \cos(\theta_i - \gamma_{in}) \quad (10)$$

$$P_n^{inj} = -V_n V_{in}^{pq} b_{in} \sin(\theta_n - \gamma_{in}) \quad (11)$$

$$Q_n^{inj} = V_n V_{in}^{pq} b_{in} \cos(\theta_n - \gamma_{in}) \quad (12)$$

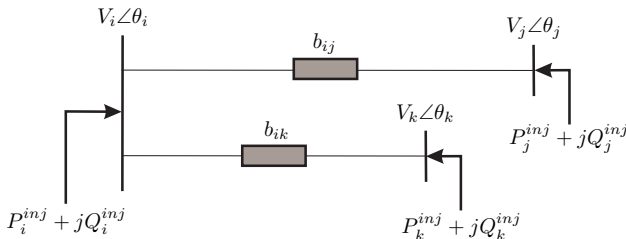


Figura 3. Modelo de injeção de potência do IPFC.

Note que a modelagem deduzida para o IPFC (5)–(8) representada na Fig. 3 facilita a inclusão do dispositivo em um algoritmo de fluxo de carga convencional, já que a modelagem proposta ao IPFC não modifica as equações de fluxo de carga e ainda considera sua contribuição como se fossem injeções de potências nas barras comuns ao dispositivo. Assim, os balanços de potências ativa e reativa, nas barras onde está conectado o IPFC, são dados por (13) e (14), respectivamente.

$$P_m^G - P_m^{inj} - P_m^D - P_m^{calc} = 0 \quad (13)$$

$$Q_m^G - Q_m^{inj} - Q_m^D - Q_m^{calc} = 0 \quad (14)$$

Em (13) e (14), $m = i, j$ e k . As potências ativa e reativa geradas são P_m^G e Q_m^G (entrando na barra m). Eventuais

cargas drenam da barra m as potências ativa e reativa P_m^D e Q_m^D , respectivamente. P_m^{calc} e Q_m^{calc} são as potências ativa e reativa convencionais transmitidas pelas linhas (deixando a barra m). As injeções de potências ativa e reativa realizadas pelo IPFC são P_m^{inj} e Q_m^{inj} .

III. MODELO DE FPO CONSIDERANDO IPFC

O modelo para FPO considerando IPFC é apresentado em (15)–(33). A função objetivo (15) minimiza os custos de geração.

$$\min \sum_{i \in \Omega_g} c_i^q (P_i^G)^2 + c_i^l P_i^G + c_i^o \quad (15)$$

Em (15), Ω_g é o conjunto de barras de geração, c_i^q , c_i^l e c_i^o são os coeficientes de custo quadrático, linear e constante de geração e P_i^G é a potência ativa gerada pelo gerador na barra i . As equações (16)–(17) representam o balanço de potência ativa e reativa no sistema (primeira lei de Kirchhoff).

$$P_i^G - P_i^D - \sum_{ji \in \Omega_l} P_{ji}^{para} - \sum_{ij \in \Omega_l} P_{ij}^{de} - \sum_{ji \in \Omega_{ip}} P_{ji}^{ip,para} - P_i^{ip,com} - V_i^2 g_i^{shb} = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (16)$$

$$Q_i^G - Q_i^D - \sum_{ji \in \Omega_l} Q_{ji}^{para} - \sum_{ij \in \Omega_l} Q_{ij}^{de} - \sum_{ji \in \Omega_{ip}} Q_{ji}^{ip,para} - Q_i^{ip,com} + V_i^2 b_i^{shb} = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (17)$$

Em (16)–(17), Ω_l é o conjunto de ramos do sistema, Ω_b é o conjunto de barras do sistema, Ω_{ip} é o conjunto de ramos com IPFC instalado, P_i^G e Q_i^G são as potências ativa e reativa geradas pelo gerador na barra i , P_i^D e Q_i^D são as potências ativa e reativa demandadas na barra i , g_i^{shb} e b_i^{shb} são a condutância e a susceptância *shunt* conectadas à barra i , V_i é o módulo da tensão na barra i , P_{ij}^{de} , P_{ij}^{para} , Q_{ij}^{de} e Q_{ij}^{para} são os fluxos de potência ativa e reativa no ramo ij , e são calculados em (18)–(21) [15]. A Fig. 4 ilustra uma linha de transmissão conectando as barras i e j do sistema.

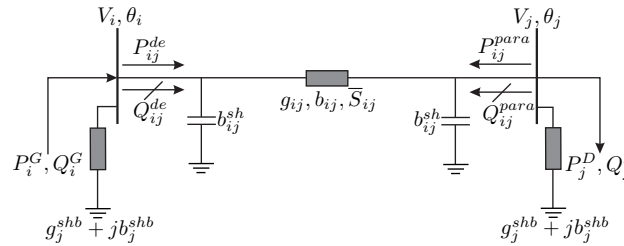


Figura 4. Modelo pi para linhas de transmissão.

Os fluxos de potência ativa e reativa nos ramos dos IPFCs são $P_{ij}^{ip,para}$ e $Q_{ij}^{ip,para}$ (24)–(25), enquanto que $P_i^{ip,com}$ e $Q_i^{ip,com}$ são as injeções de potência ativa e reativa do IPFC na barra comum de instalação, calculadas em (22)–(23).

$$P_{ij}^{de} = g_{ij} a_{ij}^2 V_i^2 - a_{ij} V_i V_j [g_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j + \varphi_{ij}) + b_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j + \varphi_{ij})] \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (18)$$

$$P_{ij}^{para} = g_{ij} V_j^2 - a_{ij} V_i V_j [g_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j + \varphi_{ij}) - b_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j + \varphi_{ij})] \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (19)$$

$$Q_{ij}^{de} = -(b_{ij} + b_{ij}^{sh}) a_{ij}^2 V_i^2 + a_{ij} V_i V_j [b_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j + \varphi_{ij}) - g_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j + \varphi_{ij})] \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (20)$$

$$Q_{ij}^{para} = -(b_{ij} + b_{ij}^{sh})V_j^2 + a_{ij}V_iV_j[b_{ij}\cos(\theta_i - \theta_j + \varphi_{ij}) + g_{ij}\sin(\theta_i - \theta_j + \varphi_{ij})] \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (21)$$

Em (18)–(21), g_{ij} é a condutância do ramo ij , b_{ij} é a susceptância do ramo ij , a_{ij} é o *tap* do transformador no ramo ij , θ_i é o ângulo de fase da tensão na barra i , φ_{ij} é o ângulo do defasador no ramo ij , e b_{ij}^{sh} é a susceptância *shunt* da linha de transmissão no ramo ij .

$$P_i^{ip,com} = -\sum_{ij \in \Omega_{ip}} b_{ij}V_iV_j \sin(\theta_i - \theta_j) - V_i \sum_{ij \in \Omega_{ip}} V_{ij}^{pq} b_{ij} \sin(\theta_i - \gamma_{ij}) \quad \forall i \in \Omega_b / \delta(i) = 1 \quad (22)$$

$$Q_i^{ip,com} = -V_i^2 \sum_{ij \in \Omega_{ip}} b_{ij} + \sum_{ij \in \Omega_{ip}} b_{ij}V_iV_j \cos(\theta_i - \theta_j) + V_i \sum_{ij \in \Omega_{ip}} V_{ij}^{pq} b_{ij} \cos(\theta_i - \gamma_{ij}) \quad \forall i \in \Omega_b / \delta(i) = 1 \quad (23)$$

Em (22)–(23), V_{ij}^{pq} e γ_{ij} são os parâmetros das fontes de tensão série do modelo do IPFC, para cada ramo ij de instalação e $\delta(i)$ indica se a barra i é uma barra comum de instalação do IPFC (se $\delta(i) = 1$). Essas injeções são calculadas na barra comum de instalação do IPFC. Em todas as outras barras elas valem zero. Em (24)–(25) são calculados os fluxos nos ramos do IPFC.

$$P_{ij}^{ip,para} = b_{ij}V_iV_j \sin(\theta_i - \theta_j) + V_{ij}^{pq} b_{ij}V_j \sin(\theta_j - \gamma_{ij}) \quad \forall ij \in \Omega_{ip} \quad (24)$$

$$Q_{ij}^{ip,para} = -b_{ij}V_j^2 + b_{ij}V_iV_j \cos(\theta_i - \theta_j) - V_{ij}^{pq} b_{ij}V_j \cos(\theta_j - \gamma_{ij}) \quad \forall ij \in \Omega_{ip} \quad (25)$$

A equação (26) representa a invariância de potência ativa no IPFC.

$$\sum_{ij \in \Omega_{ip}} [V_i V_{ij}^{pq} b_{ij} \sin(\theta_i - \gamma_{ij}) - V_i V_{ij}^{pq} b_{ij} \sin(\theta_j - \gamma_{ij})] = 0 \quad \forall i \in \Omega_b / \delta(i) = 1 \quad (26)$$

A restrição (27) é o limite de tensão nas barras do sistema, onde $\underline{V}$ e $\bar{V}$ são a tensão mínima e máxima permitidas, respectivamente.

$$\underline{V} \leq V_i \leq \bar{V} \quad \forall i \in \Omega_b \quad (27)$$

Os limites de geração são expressos em (28)–(29), onde $\underline{P}_i^G$ e $\bar{P}_i^G$ são os limites mínimo e máximo de geração de potência ativa e $\underline{Q}_i^G$ e $\bar{Q}_i^G$ são os limites mínimo e máximo de geração de potência reativa na barra i .

$$\underline{P}_i^G \leq P_i^G \leq \bar{P}_i^G \quad \forall i \in \Omega_g \quad (28)$$

$$\underline{Q}_i^G \leq Q_i^G \leq \bar{Q}_i^G \quad \forall i \in \Omega_g \quad (29)$$

O limite de capacidade das linhas de transmissão é mostrado em (30) e (31), onde $\bar{S}_{ij}$ é o limite máximo de potência aparente do ramo ij .

$$(P_{ij}^{de})^2 + (Q_{ij}^{de})^2 \leq \bar{S}_{ij}^2 \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (30)$$

$$(P_{ij}^{para})^2 + (Q_{ij}^{para})^2 \leq \bar{S}_{ij}^2 \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (31)$$

Finalmente, (32) e (33) representam os limites de ope-

ração dos IPFCs.

$$\underline{V}_{ij}^{pq} \leq V_{ij}^{pq} \leq \bar{V}_{ij}^{pq} \quad \forall ij \in \Omega_{ip} \quad (32)$$

$$-\pi \leq \gamma_{ij} \leq \pi \quad \forall ij \in \Omega_{ip} \quad (33)$$

O modelo (15)–(33) é de PNL e pode ser resolvido utilizando *solvers* de otimização.

IV. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

O modelo proposto foi implementado na linguagem de programação matemática AMPL [16] e resolvido com o solver de IPOPT [17] em um computador com um processador Intel Core i7-4770 de 3,4 GHz. O desempenho da metodologia foi avaliado com o sistema de 10 barras adaptado de [18]. Nos testes, assume-se $\underline{V} = 0,95$ pu e $\bar{V} = 1,05$ pu. O sistema é ilustrado na Fig. 5 e os dados completos do sistema são mostrados a nas Tabelas I, II e III, sendo que a Tabela I contém os dados das linhas de transmissão, a Tabela II os dados das barras e a Tabela III os dados de geração e custos do sistema [19].

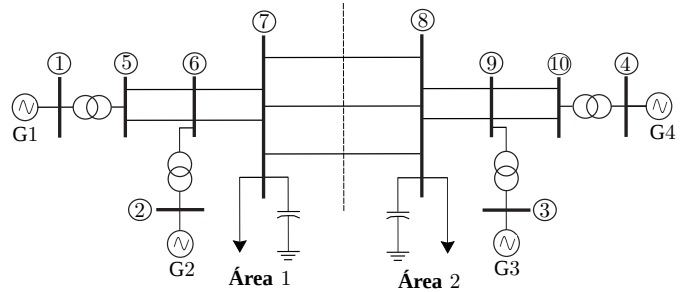


Figura 5. Diagrama unifilar do sistema de 10 barras.

Tabela I. DADOS DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

i	j	r_{ij} (pu)	x_{ij} (pu)	b_{ij}^{sh} (pu)	$\bar{S}_{ij}$ (MVA)
1	5	0,0010	0,0120	0,0000	500,0
2	6	0,0010	0,0120	0,0000	1000,0
7	8	0,0219	0,2190	0,1650	50,0
7	8	0,0219	0,2190	0,1650	50,0
7	8	0,0219	0,2190	0,1650	50,0
6	BF ₁	0,0000	0,0100	0,0000	700,0
6	BF ₂	0,0000	0,0100	0,0000	700,0
BF ₁	7	0,0017	0,0170	0,0135	620,0
BF ₂	7	0,0020	0,0200	0,0150	600,0
4	10	0,0010	0,0120	0,0000	700,0
3	9	0,0010	0,0120	0,0000	1000,0
9	8	0,0020	0,0200	0,0150	800,0
9	8	0,0020	0,0200	0,0150	800,0
5	6	0,0050	0,0500	0,0375	250,0
5	6	0,0050	0,0500	0,0375	250,0
10	9	0,0050	0,0500	0,0375	350,0
10	9	0,0050	0,0500	0,0375	350,0

A. Caso 1: Sistema sem o IPFC

Nesta situação a operação do sistema é infactível, pois as linhas dos ramos 6 – 7 e 8 – 9 não têm capacidade suficiente de transmitir a potência demandada pelas cargas. Assim, para que o sistema opere de forma adequada, uma linha deve ser instalada em algum destes caminhos, ou ainda pode-se instalar um IPFC no ramo 6 – 7, de forma que a linha de maior capacidade transmita maior potência. Essas duas alternativas são analisadas a seguir.

Tabela II. DADOS DAS BARRAS

i	P_i^D (MW)	Q_i^D (MVar)	b_i^{shb} (pu)
1	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00
7	1159,00	212,00	1,00
8	1575,00	288,00	3,50
9	0,00	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,00
BF ₁	—	—	—
BF ₂	—	—	—

Tabela III. DADOS DE GERAÇÃO

P_i^G (MW)	$\bar{P}_i^G$ (MW)	Q_i^G (MVar)	$\bar{Q}_i^G$ (MVar)	c_i^q (US\$/MW ²)	c_i^l (US\$/MW)	c_i^o (US\$)
0,0	900	-300	500	0,07	20	0,0
0,0	900	-300	500	0,25	40	0,0
0,0	900	-300	500	0,07	20	0,0
0,0	900	-300	500	0,25	40	0,0

B. Caso 2: Considerando o IPFC no Sistema

Para resolver o problema verificado em IV-A, em que a operação do sistema é infactível, um IPFC com dois conversores foi instalado entre as barras 6 – 7 (Figura 6).

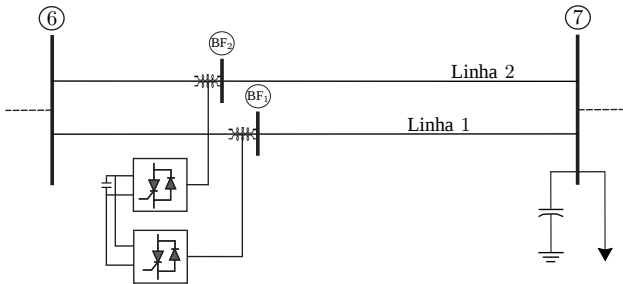


Figura 6. Local de inserção do IPFC.

A escolha do local de instalação é baseada no fato de que as duas linhas entre as barras 6 – 7 são as que possuem diferentes capacidades de transmissão e, além disso, essas linhas possuem maior capacidade de transmissão de fluxo se comparadas com as linhas restantes do sistema (ver tabela IV).

Verifica-se que após a instalação do dispositivo, a operação do sistema torna-se factível. Além disso, conforme pode ser observado na Tabela IV e Figura 7 todas as restrições impostas foram obedecidas (fluxos transmitidos nas linhas conforme Tabela I e valores de tensão para todas as barras do sistema que são de 0,95 a 1,05 pu).

Na Tabela IV, os fluxos nas linhas controlados pelo IPFC encontram-se representados em negrito.

As potências geradas nas barras de geração são 499,56 MW (P_1^G); 721,61 MW (P_2^G); 900,00 MW (P_3^G) e 688,97 MW (P_4^G). Finalmente os custos de geração foram de US\$ $407,48 \times 10^3$ e as perdas totais no sistema foram de 76,15 MW. O tempo computacional para resolver o modelo foi de 0,51 segundos.

Tabela IV. FLUXOS DE POTÊNCIA APARENTE NOS RAMOS COM IPFC

De	Para	S_{ij}	S_{ji}
1	5	500,00	497,20
2	6	807,56	772,80
7	8	27,50	12,94
7	8	27,50	12,94
7	8	27,50	12,94
4	10	698,40	687,28
3	9	945,39	912,35
9	8	786,66	771,57
9	8	786,66	771,57
5	6	248,60	246,99
5	6	248,60	246,99
10	9	343,64	337,15
10	9	343,64	337,15
6	BF ₁	620,00	605,62
6	BF ₂	600,00	588,97
BF₁	7	620,00	605,62
BF₂	7	600,00	588,97

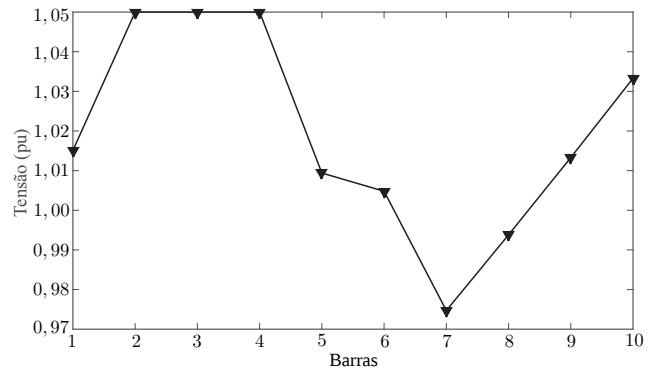


Figura 7. Perfil de tensão nas barras do sistema teste com IPFC.

C. Caso 3: Considerando a Construção de uma Linha Adicional no Ramo 6 – 7

O problema verificado em IV-A também pode ser resolvido com a construção de uma linha adicional com mesma capacidade de transmissão a uma das linhas existentes entre as barras 6 – 7 (ramo 3 da Figura 8).

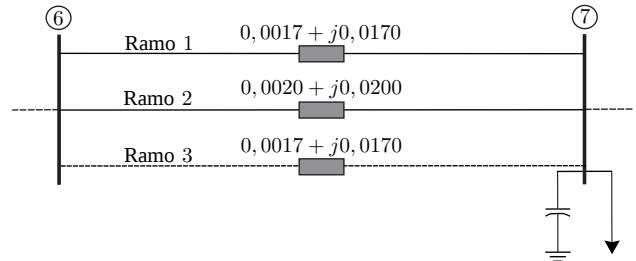


Figura 8. Inclusão de uma nova linha entre as barras 6 – 7.

De forma análoga ao ocorrido em IV-B, verifica-se que após a inclusão de uma linha adicional entre as barras 6 – 7, a operação do sistema torna-se factível, obedecendo a todas as restrições impostas. Na Tabela V e Figura 9 é possível verificar todos os fluxos transmitidos nas linhas estão dentro dos limites de capacidade mostrados na Tabela I. Além disso, os valores de tensão para todas as barras do sistema estão na faixa estipulada (0,95 a 1,05 pu).

Na Tabela V o fluxo de potência no ramo adicional encontra-se em negrito.

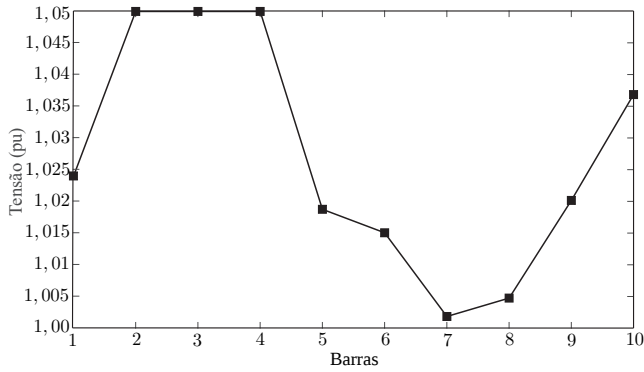


Figura 9. Perfil de tensão nas barras do sistema teste com uma linha adicional.

Tabela V. FLUXOS DE POTÊNCIA APARENTE NOS RAMOS CONSIDERANDO UMA LINHA ADICIONAL

De	Para	S_{ij}	S_{ji}
1	5	500,00	497,48
2	6	844,15	816,06
7	8	43,28	39,27
7	8	43,28	39,27
7	8	43,28	39,27
6	7	453,07	447,38
6	7	385,07	380,28
6	7	453,07	447,38
4	10	607,53	599,97
3	9	928,82	902,43
9	8	743,17	732,02
9	8	743,17	732,02
5	6	248,74	247,29
5	6	248,74	247,29
10	9	299,98	295,26
10	9	299,98	295,26

As potências geradas nas barras de geração são 499,72 MW (P_1^G); 798,75 MW (P_2^G); 900,00 MW (P_3^G) e 601,74 MW (P_4^G). Os custos de geração para este caso foram de US\$ $408,23 \times 10^3$ e as perdas totais no sistema foram de 66,23 MW. O tempo computacional para resolver o modelo foi de 0,07 segundos.

V. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado um modelo matemático de otimização para o problema de fluxo de potência ótimo considerando a presença de dispositivos IPFC. O modelo obtido é de programação não linear, e foi escrito na linguagem de modelagem matemática AMPL e resolvido com o solver IPOPT.

O modelo foi aplicado à uma versão modificada do sistema de 10 barras, disponível na literatura. Duas alternativas para tornar a operação do sistema adequada foram analisadas, uma considerando a instalação do IPFC e outra construindo-se uma linha de transmissão adicional no sistema. A metodologia utilizada se mostrou eficiente e os resultados demonstram que o IPFC é capaz de melhorar a operação do sistema, aliviando congestionamentos nas linhas de transmissão. A metodologia proposta pode ser utilizada desta forma no planejamento da expansão do sistema. Dentre as alternativas o planejador do sistema deve escolher a mais vantajosa.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo nº 2014/23741 – 9, pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] E. H. Watanabe, P. G. Barbosa, K. C. Almeida, and G. N. Taranto, “Tecnologia facts - tutorial,” *SBA Controle & Automação, Campinas*, vol. 9, no. 1, pp. 39–55, 1998.
- [2] J. Paserba, “How facts controllers-benefit ac transmission systems,” in *Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2003 IEEE PES*, vol. 3, Sept 2003, pp. 949–956.
- [3] N. Hingorani, “Power electronics in electric utilities: role of power electronics in future power systems,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 76, no. 4, pp. 481–482, Apr 1988.
- [4] D. Valle and P. Araujo, “The influence of GUPFC FACTS device on small signal stability of the electrical power systems,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 65, pp. 299–306, February 2015.
- [5] L. Gyugyi, K. Sen, and C. D. Schauder, “The interline power flow controller concept: a new approach to power flow management in transmission systems,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 3, pp. 1115–1123, Jul 1999.
- [6] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, *Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission system*. New York: IEEE, 1999.
- [7] J. A. Pomilio, H. K. M. Paredes, and S. M. Deckmann, *Eletrônica de Potência no Sistema de Transmissão: Dispositivos FACTS*, Campinas, 2013.
- [8] M. M. Menezes, P. Araujo, and E. V. Fortes, “Bacterial foraging optimization algorithm used to adjust the parameters of power system stabilizers and thyristor controlled series capacitor-power oscillation damping controller,” in *Industry Applications (INDUSCON), 2014 11th IEEEIAS International Conference on*, Dec 2014, pp. 1–6.
- [9] X.-P. Zhang, E. Handschin, and M. Yao, “Modeling of the generalized unified power flow controller (GUPFC) in a nonlinear interior point OPF,” *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 16, no. 3, pp. 367–373, Aug 2001.
- [10] E. Acha, C. Fuerte-Esquivel, H. Ambriz-Pérez, and C. Angeles-Camacho, *FACTS: Modelling and Simulation in Power Networks*. Wiley, 2004.
- [11] J. Zhang, “Optimal power flow control for congestion management by interline power flow controller (ipfc),” in *Power System Technology, 2006. PowerCon 2006. International Conference on*, Oct 2006, pp. 1–6.
- [12] J. Zhang and A. Yokoyama, “Power system transient stability improvement by the interline power flow controller (IPFC),” *IEEE Transactions Power & Energy*, vol. 128, no. 1, pp. 208–215, 2008.
- [13] J. Zhang, A. Yokoyama, and T. Ide, “Use of IPFC detailed dynamic model for analysis of power flow control and small-signal stability enhancement,” *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 4, no. 5, pp. 654–662, 2009.
- [14] X.-P. Zhang, “Modelling of the interline power flow controller and the generalised unified power flow controller in newton power flow,” *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings*, vol. 150, no. 3, pp. 268–274, May 2003.
- [15] A. J. Monticelli, *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1983.
- [16] R. Fourer, D. Gay, and B. Kernighan, *AMPL: A Modeling Language for Mathematical Programming*. Scientific Press, 1993.
- [17] A. Wächter and L. T. Biegler, “On the implementation of an interior-point filter line-search algorithm for large-scale nonlinear programming,” *Mathematical Programming*, vol. 106, no. 1, pp. 25–57, March 2006.
- [18] P. Kundur, *Power system stability and control*. New York: MacGraw-Hill, 1994.
- [19] “IEEE PES working group on modern heuristic optimization,” <https://www.uni-due.de/ieee-wgmho/competition2014>, accessed: 2015-11-24.