

FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO PARA ESTUDOS DE SEGURANÇA DE TENSÃO CONSIDERANDO A REGULAÇÃO PRIMÁRIA DE FREQUÊNCIA DE GERADORES

Thiago Resende de Almeida

Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)
Rua José Lourenço Kelmer, s/n. CEP 36.036-330 – Juiz de Fora, MG
thiagoptt@hotmail.com

Paula de Oliveira La Gatta

Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)
Rua José Lourenço Kelmer, s/n. CEP 36.036-330 – Juiz de Fora, MG
paula.lagatta@gmail.com

João Alberto Passos Filho

Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)
Rua José Lourenço Kelmer, s/n. CEP 36.036-330 – Juiz de Fora, MG
joao.passos@ufjf.edu.br

Ricardo Mota Henriques

Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)
Rua José Lourenço Kelmer, s/n. CEP 36.036-330 – Juiz de Fora, MG
ricardo.henriques@ufjf.edu.br

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo principal a proposição de uma formulação alternativa para o problema de Fluxo de Potência Ótimo. Tal formulação leva em consideração a regulação primária de frequência de geradores síncronos. Isto é feito através da inclusão de restrições de igualdade adicionais na formulação clássica do problema. Apesar de poder ser formulada com qualquer função objetivo, utiliza-se neste trabalho uma função objetivo de máximo carregamento do sistema. São utilizados dois sistemas teste para validação da metodologia proposta. O primeiro é um sistema tutorial de duas barras e o segundo um sistema de 16 barras que representa uma região do SIN.

PALAVRAS CHAVE: Fluxo de Potência Ótimo, Otimização, Fluxo de Potência.

Área principal: “PO na Área de Energia”

ABSTRACT

The main objective of this paper is to propose an alternative formulation for the OPF problem. Such a formulation takes into account the primary frequency regulation of synchronous generators. This is done with additional equality constraints in the classical formulation of the problem. Although it can be formulated with any objective function, this work uses an objective function of maximum system loading. Two test systems are used to validate the proposed methodology. The first one is a tutorial system and the second one is a small system of 16 buses, representing an equivalent region of the Brazilian System.

KEYWORDS: Optimal Power Flow, Optimization, Power Flow.

Main area: “OR in Energy”

1. Introdução

O crescimento dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP) devido ao aumento da demanda de energia elétrica e à necessidade de maior confiabilidade, aliado à necessidade de redução de custos operacionais resultou em uma interligação cada vez maior entre os diversos sistemas de geração existentes. Os sistemas interligados são vantajosos na medida em que permitem ganhos energéticos através da coordenação da operação hidrotérmica, que garante melhor aproveitamento hidrológico entre as bacias existentes. Também é possível citar outras vantagens das interligações, como por exemplo, garantir o controle de carga/frequência quando da perda súbita de geração, socorro mútuo entre os subsistemas, compra e venda de energia entre eles.

Contudo, com o aumento destas interligações, a operação coordenada do sistema torna-se bastante complexa e os riscos de blecautes na rede aumentam significativamente. É, portanto, necessário das funções de planejamento e operação para que o desempenho alcançado seja compatível com os requisitos de qualidade e segurança. Adicionalmente, tornam-se necessários para sua operação, conhecimentos pormenorizados de sua proteção. Além disso, deve-se desenvolver ferramentas computacionais que facilitem as análises rápidas das suas condições de regime permanente, segurança de tensão e estabilidade.

A partir deste contexto, verifica-se que o problema de Fluxo de Potência Ótimo (FPO) tem grande importância nos estudos atuais de sistemas de potência de grande porte, como o caso do Sistema Interligado Nacional (SIN). Os problemas de FPO (Latorre, 1995) inserem-se na área de Programação Não Linear (PNL) de grande porte. A finalidade principal de um FPO é o estabelecimento dos controles e a determinação do estado operativo de um SEP que minimiza (ou maximiza) o valor de uma determinada função objetivo sujeita às restrições físicas e operacionais impostas ao problema. No processo de solução, as variáveis de controle que têm influência sobre o valor da função objetivo são ajustadas automaticamente de modo a se obter o ponto ótimo de solução. As aplicações de FPO em sistemas de potência são diversas. Por exemplo, a referência Graville *et alii* (1996) discute a aplicação da ferramenta para a determinação do mínimo corte de carga de forma a restaurar um ponto operação viável, como também endereçado em Souza *et alii* (2008) com auxílio de funções de energia.

A modelagem polar ou retangular para o FPO é abordada em (Torres, 1998), com a conclusão que, quanto ao desempenho, a diferença é irrelevante. O problema do tamanho do passo é abordado em (Torres, 2001) com o objetivo de produzir um algoritmo de FPO mais eficiente. A questão de eficiência do algoritmo é também abordada em (Almeida, 1994), que propõe um FPO paramétrico que monitora o caminho de solução e satisfaz as condições de Karush-Khun-Tucker (Luenberger, 2008). Em Castronuovo (2001) é feito um estudo dos principais métodos de solução baseados em pontos interiores aplicados ao problema de FPO.

O principal objetivo deste trabalho é propor uma formulação alternativa do problema de FPO. Nesta formulação são incluídas restrições de igualdade que modelam o comportamento da regulação primária de frequência de geradores síncronos em regime permanente, permitindo a obtenção de estimativas mais realistas de variação de frequência e resposta de geração de potência ativa das máquinas do sistema. São utilizados dois sistemas teste, são eles: (i) o primeiro de duas barras de valor tutorial; (ii) o segundo um sistema de 16 barras que representa parte do SIN.

Este trabalho está dividido em 5 seções, incluindo esta. A seção 2 apresenta uma breve revisão dos principais conceitos associados à regulação primária de frequência em SEP. Na seção 3 é descrita a modelagem proposta para a modelagem do FPO com representação da regulação primária. A seção 4 reúne os principais resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia proposta em 2 sistemas teste. Finalmente a seção 5 apresenta as principais conclusões com relação à metodologia proposta e discute a evolução do trabalho de pesquisa.

2. Regulação Primária de Frequência

Cargas se conectam ou se desligam de um sistema de potência de forma aleatória. Após essa variação de carga, o sistema atinge um novo estado de equilíbrio, no qual, dentre outros parâmetros, pode não ter a mesma frequência de operação da situação pré-distúrbio.

Um SEP tem uma característica inerente, denominada de Regulação Própria, que consiste basicamente na capacidade deste sistema de alcançar um novo estado de equilíbrio, em resposta a uma variação instantânea da potência gerada com relação à potência consumida, supondo que as unidades geradoras do sistema não pudessem efetuar nenhum tipo de auxílio (Vieira Filho, 1984).

A Regulação Própria é representada pelo parâmetro D chamado coeficiente de amortecimento, cujo valor pode ser obtido através de (1).

$$D = \frac{\Delta P_D}{\Delta f} \quad (1)$$

onde ΔP_D representa a variação de potência ativa demandada e Δf representa a variação da frequência de operação do sistema. A Figura 1 mostra uma curva típica representativa da variação da carga com a frequência.

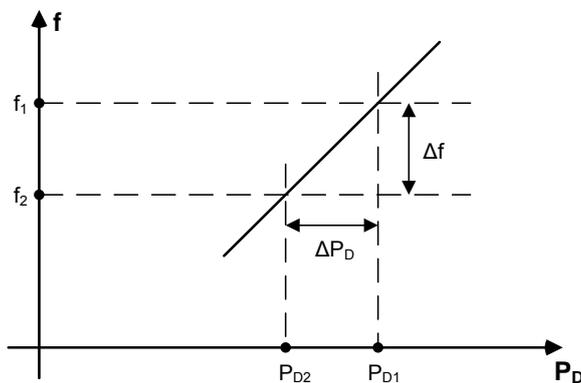


Figura 1 - Curva de variação da carga com a frequência

Valores típicos para D são baixos, entre 1% e 2% (Vieira Filho, 1984), (Kundur, 1994), (Wollenberg and Wood, 1996). O valor do coeficiente de amortecimento igual a 2 significa que uma variação de 1% da frequência do sistema equivale a 2% de variação da carga.

Para sistemas de grande porte, a variação de carga em certo instante de tempo pode ser considerável, e devido à relação direta com a frequência, tal parâmetro pode também sofrer grandes excursões de valor. Portanto, essa situação hipotética indica a necessidade de se contar com controladores que atuem nesse desbalanço entre carga e geração.

Exatamente por essa razão, as unidades geradoras são dotadas de mecanismos de regulação de velocidade automática, que atuam no sentido de elevar ou reduzir a potência do gerador, quando a velocidade (ou a frequência) se afasta de seu valor de referência (Vieira Filho, 1984).

Essa regulação automática é feita pelos reguladores de velocidade das máquinas, sendo denominada de Regulação Primária. Existem basicamente dois tipos de reguladores de velocidade, a saber: reguladores isócronos e reguladores com queda de velocidade. A teoria por trás dos reguladores isócronos foge ao escopo do artigo, pois não possui participação satisfatória em sistemas com mais de uma unidade geradora (Vieira Filho, 1984), (Wollenberg and Wood, 1996). Assim, a atenção será transferida apenas para os reguladores com queda de velocidade, cujo diagrama de blocos genérico pode ser visto

através da Figura 2.

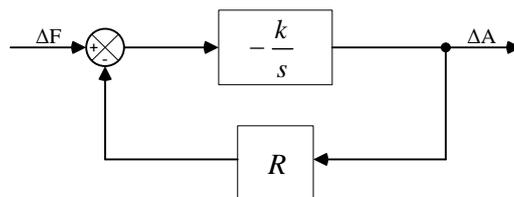


Figura 2 - Diagrama de blocos do regulador com queda de velocidade

Na Figura 2, ΔF representa a variação de frequência em p.u., sendo a entrada do controlador, e ΔA é a saída da malha de controle e representa a variação da abertura da admissão da turbina, em p.u. e R é o estatismo da máquina e será definido posteriormente. O integrador (k/s) , sem a malha de realimentação converteria diretamente uma variação de frequência ΔF_1 em uma variação da admissão da turbina ΔA_1 . A malha de realimentação, com o parâmetro R , surge como uma forma de mudar o valor da referência a partir de seu ajuste. Ou seja, a realimentação é proporcional à variação da admissão da turbina.

A função de transferência que representa a malha de controle da Figura 2 pode ser deduzida da forma demonstrada em (2):

$$\frac{\Delta A}{\Delta F} = \frac{-\frac{k}{s}}{1 + \frac{k \cdot R}{s}} \times \frac{\left(\frac{s}{k \cdot R}\right)}{\left(\frac{s}{k \cdot R}\right)} = \frac{-\frac{1}{R}}{1 + s \cdot \left(\frac{1}{R \cdot k}\right)} \quad (2)$$

Usando valores em p.u., pode-se demonstrar que a variação da admissão da turbina é proporcionalmente igual a variação de potência ativa gerada (Vieira Filho, 1984). Ou seja, a aproximação representada através de (3) pode ser aplicada à (2), determinando assim (4).

O parâmetro $(1/R)$ é chamado de Energia de Regulação da Máquina, e R representa a característica estática do regulador de velocidade, chamado de estatismo. Para determinar essa característica estática, basta utilizar-se o teorema do valor final na função de transferência representado por (4), determinando assim (5).

$$\Delta A = \Delta P_G \quad (3)$$

$$\frac{\Delta P_G}{\Delta F} = \frac{-\frac{1}{R}}{1 + s \cdot \left(\frac{1}{R \cdot k}\right)} \quad (4)$$

$$\left(\frac{\Delta P_G}{\Delta F}\right)_{r.p.} = -\frac{1}{R} \quad (5)$$

Rearranjando a equação (5) pode-se obter a equação final dada por (6).

$$P_G - P_{G_0} + \frac{1}{R} \cdot (f - f_0) = 0 \quad (6)$$

A equação (6) corresponde a equação de uma reta que passa pelo ponto (P_{G_0}, f_0) , ou seja, em um caso base na qual a potência gerada pela máquina P_{G_0} corresponde a uma frequência de operação do sistema dada por f_0 . Essa equação de reta está representada no gráfico da Figura 3.

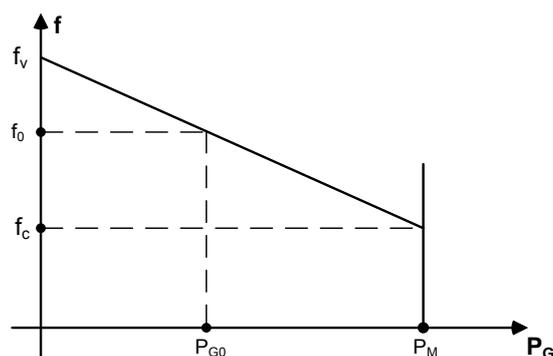


Figura 3 - Característica estática do regulador de velocidade

A definição formal do estatismo representada por (7) é a variação de velocidade da máquina que se tem ao passar-se de carga zero (frequência f_v) a 100% da carga (frequência f_c), expresso em p.u. da velocidade nominal (frequência f_n) (Vieira Filho, 1984).

$$R_{pu} = \frac{f_v - f_c}{f_n} \quad (7)$$

O estatismo R é uma medida da participação de cada máquina do sistema nas perdas e na variação de carga (Milano, 2010). Ou seja, na operação de um sistema com mais de uma máquina geradora que contenham reguladores de velocidade, o estatismo de cada gerador define a repartição de geração em um cenário de aumento ou diminuição de carga, além das perdas. O valor deste parâmetro geralmente é dado na base em potência aparente da máquina. Portanto, para o uso em estudos de fluxo de potência, deve ser convertido para a base do sistema em questão, com o uso de (8).

$$(R)_{p.u.}^{bs} = (R)_{p.u.}^{bm} \times \frac{P^{bs}}{P^{bm}} \quad (8)$$

3. Metodologia Proposta

O FPO é formulado matematicamente como um problema genérico de programação não linear, de acordo com o seguinte formato padrão (9):

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } f(x) \\ & \text{s.a.} \\ & \quad g_i(x) = 0 \\ & \quad h_j(x) \geq 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Onde $f(x)$ é a função objetivo, as equações $g_i(x) = 0$ são as restrições de igualdade e $h_j(x) \geq 0$ são as restrições de desigualdade. No caso do FPO, as restrições de igualdade são estabelecidas pelas equações do fluxo de potência ativa e reativa da rede elétrica. Por outro lado, as restrições de desigualdade são definidas pelos limites das variáveis de controle e restrições físicas e operacionais do sistema.

Neste trabalho é proposta uma metodologia alternativa do problema de FPO, considerando-se adicionalmente como restrições de igualdade as equações que representam a resposta da regulação primária de frequência dos geradores síncronos do sistema.

Adota-se a função objetivo de máximo carregamento do sistema, de forma a se obter as margens de potência ativa do sistema. No entanto, é importante ser destacado que qualquer função objetivo poderia ser modelada segundo a formulação proposta neste trabalho.

De forma resumida o que é proposto é a inclusão de uma equação adicional para

cada gerador do sistema. Tal equação é responsável por representar a característica de variação da geração de potência ativa dos geradores de acordo com as características das máquinas e respectivos ajustes na malha de controle responsável pela regulação primária dos geradores.

As equações de (10) à (19) mostram a formulação adotada:

$$\text{Max} \sum_{i=1}^{nbl} (1 + \mu) \cdot P_{L_i} \quad (10)$$

Sujeito a:

$$V_i \cdot \sum_{i,j \in \Omega} V_j \cdot (G_{ij} \cdot \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \cdot \sin(\theta_i - \theta_j)) = P_{G_i} - (1 + \mu) \cdot P_{L_i} \quad (11)$$

$$V_i \cdot \sum_{i,j \in \Omega} V_j \cdot (G_{ij} \cdot \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cdot \cos(\theta_i - \theta_j)) = Q_{G_i} - (1 + \mu) \cdot Q_{L_i} \quad (12)$$

$$P_{G_{ig}} = P_{G_{ig}}^{esp} - \frac{1}{R_{ig}} \cdot (f - f^{esp}) \quad (13)$$

$$f^{\min} \leq f \leq f^{\max} \quad (14)$$

$$P_{G_{ig}}^{\min} \leq P_{G_{ig}} \leq P_{G_{ig}}^{\max} \quad (15)$$

$$Q_{G_{ig}}^{\min} \leq Q_{G_{ig}} \leq Q_{G_{ig}}^{\max} \quad (16)$$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (17)$$

$$Fl_{ij}^{\min} \leq Fl_{ij} \leq Fl_{ij}^{\max} \quad (18)$$

$$Fl_{ji}^{\min} \leq Fl_{ji} \leq Fl_{ji}^{\max} \quad (19)$$

onde,

$i, j = 1, 2, 3, \dots, nb$, e nb é o número de barras do sistema;

$ig = 1, 2, 3, \dots, ng$, e ng é o número de geradores do sistema;

nbl é o número de barras de carga participantes do carregamento;

Ω_i é o conjunto de todas as barras diretamente conectadas a barra i ;

As equações de (11) a (13), constituem as restrições de igualdade do FPO, onde as duas primeiras são as equações de balanço de fluxo de potência ativo e reativo para cada nb barra do sistema, respectivamente. A terceira se refere à característica estática do regulador com queda de velocidade para cada ng barra de geração, definida em (Vieira Filho, 1984). Neste caso, a equação (13) irá definir a direção de variação da potência ativa gerada por cada gerador do sistema, dependendo do estatismo R_{ig} de cada máquina. Além disso, dependerá novamente de um par de valores $(P_{G_{ig}}^{esp}, f^{esp})$ já conhecido para a construção da equação para cada gerador.

As inequações de (14) a (19) representam as restrições de desigualdade da formulação do FPO, que contém os limites operacionais de um sistema de potência, onde (14) representa os limites de frequência de operação do sistema. As inequações (15) e (16) representam os limites de geração de potência ativa e reativa das barras de geração, respectivamente. Os limites de tensão nas barras do sistema estão representados em (17) e os limites de fluxo estão contidos em (18) e (19).

A formulação descrita pelas equações (10) à (19) foi implementada utilizando-se o ambiente LINGO® (LINDO, 2008), que utiliza métodos já estabelecidos de programação linear, não linear, linear inteira mista, dentre outras, capazes de solucionar o problema. A plataforma LINGO® oferece linguagem de programação própria, permitindo uma rápida implementação de modelos de otimização.

4. Resultados

Para validação da metodologia proposta são utilizados dois sistemas teste de pequeno porte. O primeiro é um sistema de duas barras de valor tutorial. O segundo sistema utilizado é composto por 16 barras, representando uma pequena parte do SIN e suas principais características. A seguir são apresentados os resultados obtidos.

4.1 Sistema Teste de 2 Barras

A Figura 4 mostra a topologia do sistema de duas barras estudado. A Figura 5 mostra o circuito elétrico equivalente deste sistema. Devido a grande simplicidade deste sistema a solução do máximo carregamento pode ser obtida analiticamente. Também é importante destacar que o estudo deste sistema tem objetivo de validação da ferramenta desenvolvida e não representa de forma adequada a operação isolada de uma carga por um gerador, uma vez que a regulação de frequência poderia ser feita por um regulador isócrono e não com estatismo.



Figura 4 - Sistema Radial Carga versus Gerador

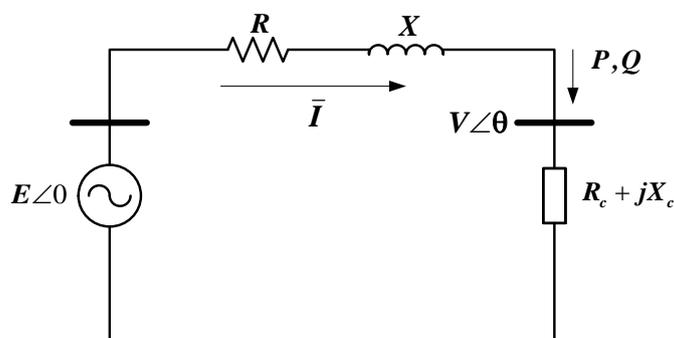


Figura 5 - Circuito Equivalente do Sistema Radial Carga versus Gerador

A Figura 6 mostra a evolução da potência ativa consumida pela carga, módulo da tensão na carga e módulo da corrente da malha do circuito da Figura 5 em função do crescimento da resistência da carga. Considera-se a carga totalmente compensada ($\cos\phi = 1$) e a impedância do circuito igual a $0 + j \cdot 0,20$ p.u.. A solução deste problema é bem conhecida na literatura sendo mostrada abaixo:

$$P^{max} = \frac{E^2}{2 \cdot X} = 2,50 \text{ p.u.} \quad (20)$$

$$V^{max} = \frac{E}{\sqrt{2}} \cong 0,707 \cdot E = 0,707 \text{ p.u.} \quad (21)$$

O FPO implementado neste trabalho foi capaz de obter os mesmo resultados apresentados em (20) e (21) com eficiência. Além disso, foi possível obter a frequência do sistema no ponto de máximo carregamento no valor de 52,53 Hz. Adotou-se neste teste 5 % de estatismo no regulador de velocidade da máquina.

Com a finalidade de verificar os resultados obtidos também foi desenvolvida uma ferramenta baseada na utilização Fluxo de Potência Continuado (FPC) (Ajarapu and Colin, 1992), considerando-se a formulação do problema com a regulação primária de frequência.

Os resultados obtidos foram compatíveis com aqueles obtidos com o FPO. As Figuras 7 e 8 mostram as curvas de variação da tensão e frequência com o carregamento do sistema que foram obtidas com o FPC.

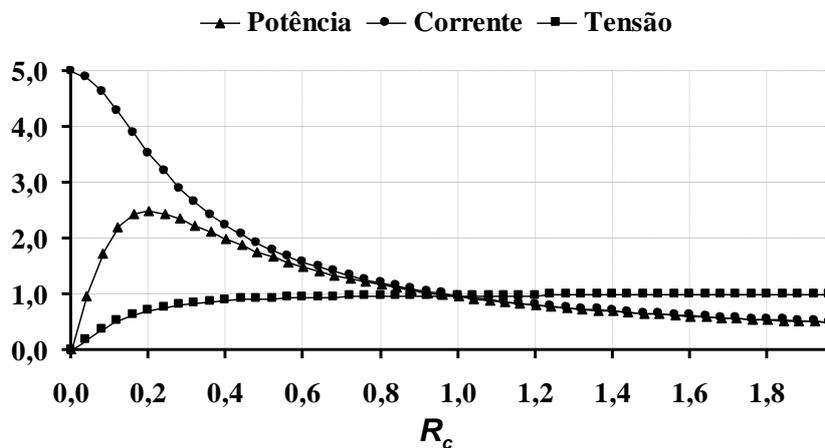


Figura 6 - Potência, Corrente e Tensão versus Resistência da Carga

Como esperado o FPO foi capaz de identificar o ponto de máximo carregamento sem a necessidade de se obter toda a trajetória do sistema, como utilizado no FPC.

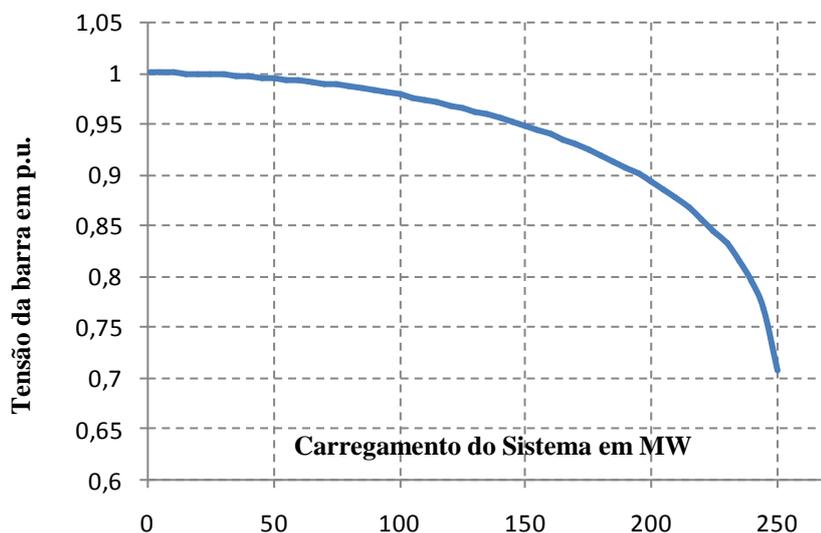


Figura 7 – Tensão na barra de carga versus aumento de carregamento do sistema

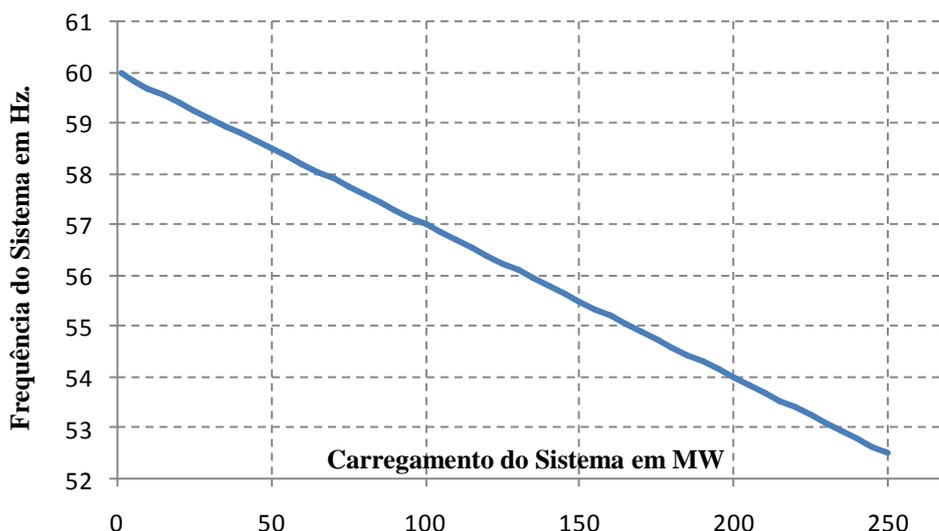


Figura 8 – Frequência do sistema *versus* aumento de carregamento do sistema

4.2 Sistema Teste de 16 Barras

A topologia básica deste sistema é mostrada na Figura 9. Destaca-se que, apesar de pequeno porte, possui as principais características de sistemas de grande porte (representação de perdas, transformadores, equipamentos *shunts*, etc).

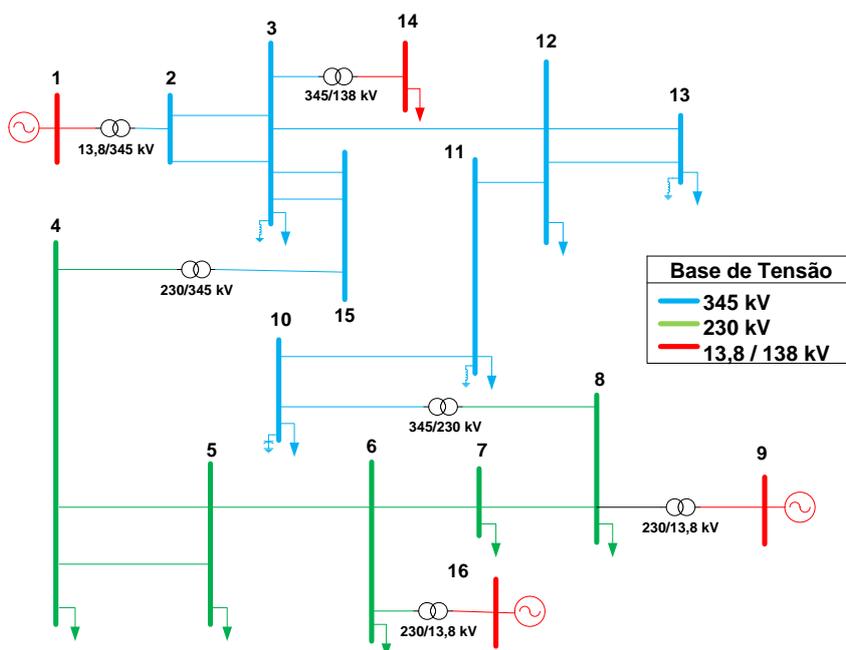


Figura 9 – Topologia do sistema teste de 16 barras (segundo sistema teste)

Este sistema foi extraído a partir de dados do sistema de Furnas da região Goiás/Brasília, em três níveis de tensão (138 kV, 230 kV e 345 kV), como descrito em (Alves, 2007). A rede deste sistema foi montada a partir de trechos do sistema elétrico daquela região. Apesar de se tratar de um sistema com aspectos didáticos, este sistema apresenta características de um sistema real. O sistema possui duas áreas elétricas, a Área 1 concentra a rede de alta tensão (345 kV) e a Área 2 concentra a rede de baixa tensão (230 kV). Este sistema foi proposto em (Alves, 2007).

De acordo com o submódulo 23.3 dos Procedimentos de Rede do ONS, o esquema de alívio de carga por subfrequência deve ser dimensionado para garantir, após a sua atuação, que a frequência estabilize em 59,5 Hz e os limites de tensão a serem observados nos estudos elétricos para a condição operativa normal e para condição operativa de emergência são de 1,05 p.u. a 0,95 p.u. para tensões até 345 kV (ONS, 2010).

Os limites utilizados para frequência e tensão foram os seguintes: $59,5 \leq f \leq 60,5$ Hz, $0,95 \leq V_i \leq 1,05$ p.u., respectivamente. Com estas restrições estabelecidas, a Barra 14 apresentou a menor tensão em p.u. entre as nb barras. A frequência do sistema fixou em 59,5 Hz com um carregamento total de 410,95 MW. Estes resultados são validados com o PFC. Destaca-se que o aumento do carregamento foi limitado pela restrição de frequência do sistema.

A Tabela 1 mostra uma comparação entre as margens de carregamento obtidas com o FPO em três situações distintas. Na primeira não são consideradas as restrições de tensão e frequência, na segunda são consideradas as restrições de tensão nas barras e, por último, considera-se as restrições de tensão e a da frequência.

Tabela 1 – Valor da Tensão em barras do sistema de 16 Barras

<i>Limites Considerados</i>	<i>Máximo Carregamento (MW)</i>	<i>Comparação Percentual</i>
Nenhum	820,24	100 %
Tensão	459,00	55,96 %
Tensão e Frequência	410,95	50,10 %

De forma a validar a metodologia proposta outro teste foi realizado. Este consiste em utilizar o FPC para avaliação do máximo carregamento do sistema, onde não são considerados limites. Em outras palavras, obtém-se o máximo carregamento devido a limitação da capacidade de transmissão da rede.

As Figuras 10 e 11 mostram a evolução do perfil de tensão das barras 13 e 6, respectivamente. A Figura 12 mostra a evolução da variação da frequência do sistema. O ponto de máximo carregamento obtido pelo FPC foi 820,24 MW com a frequência de 57,4345 Hz. O FPO proposto foi capaz de reproduzir com exatidão estes resultados se as restrições de tensão e frequência não forem incluídas.

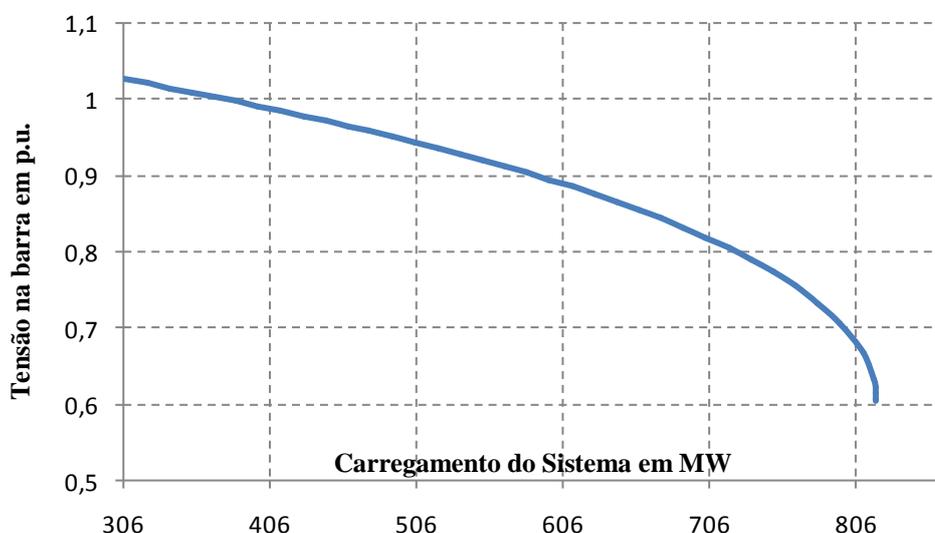


Figura 10 – Tensão na barra 13 de carga *versus* aumento de carregamento do sistema

Na Figura 12 é possível verificar que o carregamento do sistema quando a frequência

passa pelo valor de 59,5 Hz está compatível com os resultados obtidos pelo FPO proposto. Também é possível verificar que o carregamento máximo obtido é mais restritivo quando é considerado o limite de variação de frequência, mesmo quando se considera o limite de 0,95 p.u. para os valores de tensão.

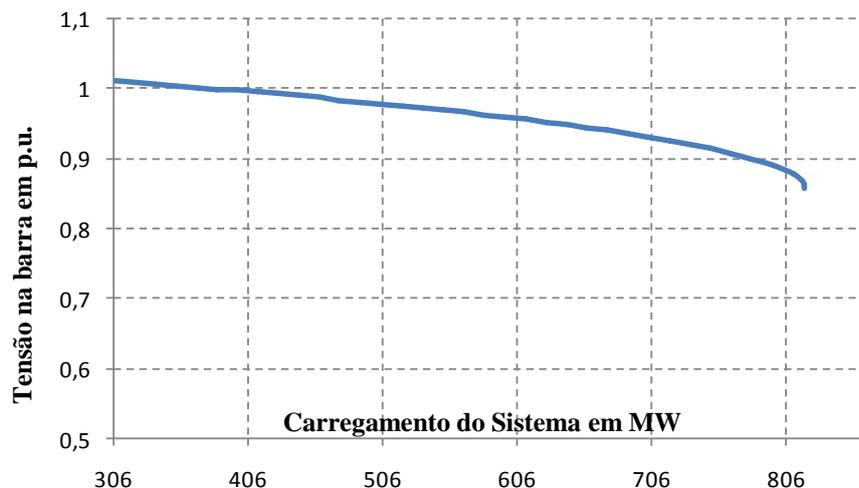


Figura 11 – Tensão na Barra 6 de carga *versus* aumento de carregamento do sistema

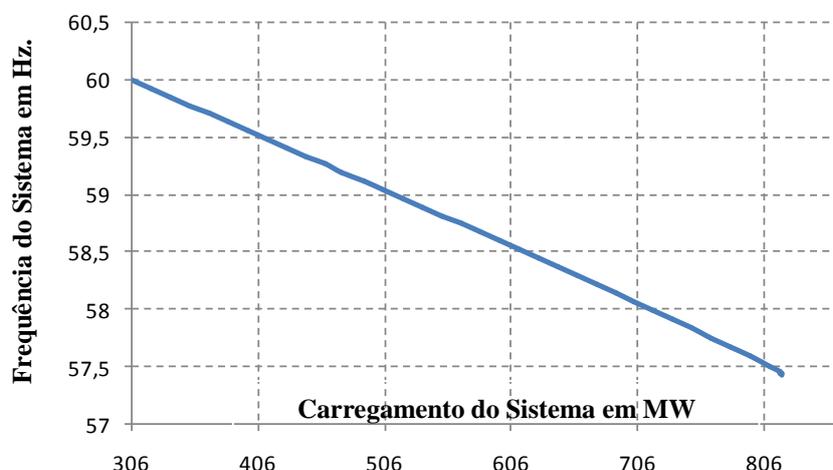


Figura 12 – Frequência do sistema *versus* aumento de carregamento do sistema

É importante destacar que o perfil de geração tanto de potência ativa quanto de potência reativa no ponto de máximo carregamento foram os mesmos no FPC e no FPO. Isto mostra que a modelagem computacional do FPO reproduz o comportamento do sistema, onde os geradores respondem de acordo com suas características construtivas e ajustes nos controles.

5. Conclusões

Este trabalho apresentou uma formulação alternativa para o problema de Fluxo de Potência Ótimo. Nesta formulação as características de regime permanente da atuação da regulação primária de geradores síncronos são incluídas no problema através de restrições de igualdade.

A metodologia proposta foi validada através de dois sistemas testes. O primeiro foi formado por apenas duas barras, tendo valor tutorial. O segundo teste utilizou um sistema de 16 barras que representa parte do Sistema Interligado Nacional. Os resultados obtidos

foram totalmente compatíveis com uma formulação do Fluxo de Potência Continuado, onde as mesmas características dos reguladores de velocidade foram representadas. Neste sentido, é possível concluir que a formulação do FPO proposto obteve resultados coerentes com os esperados.

Os resultados mostrados mostraram que a metodologia proposta é coerente com outras ferramentas que consideram a regulação primária de geradores em sua formulação, como por exemplo, o Fluxo de Potência Continuado. Além disso, verificou-se que a inclusão dos limites de frequência pode ser importante, pois em algumas situações pode ser mais restritiva quando comparado com os limites obtidos onde os limites não são considerados.

Avalia-se que com o aumento da complexidade dos sistemas elétricos, ferramentas computacionais que representem de forma adequada o comportamento do sistema são bem vindas. A partir de tudo o que foi exposto, acredita-se que a formulação proposta possa ser utilizada em estudos reais de sistemas de potência de grande porte de forma complementar as ferramentas atualmente utilizadas.

Referências

- Ajjarapu, Venkataramana, and Colin Christy.** "The continuation power flow: a tool for steady state voltage stability analysis." *Power Systems, IEEE Transactions on* 7, no. 1 (1992): 416-423.
- Almeida, KC de, F. D. Galiana, and S. Soares.** "A general parametric optimal power flow." *Power Systems, IEEE Transactions on* 9, no. 1 (1994): 540-547.
- Alves, Waschington Fernandes.** "Proposição de sistemas-teste para análise computacional de sistemas de potência". Dissertação de mestrado, UFF, Niterói, RJ, Brasil, 2007.
- Castronuovo, Edgardo Daniel.** "Aplicação de métodos de pontos interiores no fluxo de potência ótimo não-linear com utilização de processamento de alto desempenho.". Tese de doutorado, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 2001.
- Granville, S., J. C. O. Mello, and A. C. G. Melo.** "Application of interior point methods to power flow unsolvability." *Power Systems, IEEE Transactions on* 11.2 (1996): 1096-1103.
- Kundur, Prabha.** *Power system stability and control*. Tata McGraw-Hill Education, 1994.
- Latorre, M. L.** *Aplicação do Método de Pontos Interiores Primal-Dual para a Resolução do Problema de Fluxo de Potência Ótimo*. Diss. Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1995.
- LINDO System Inc.,** "LINGO - User's Guide". 2008.
- Luenberger, David G., and Yinyu Ye.** *Linear and nonlinear programming*. Vol. 116. Springer, 2008.
- Milano, Federico.** *Power system modelling and scripting*. Springer, 2010.
- Operador Nacional do Sistema (ONS).** *Submódulo 23.3 dos Procedimentos de Rede: Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos*. Setembro, 2010.
- Souza, A. C. Z., Rafael C. Leme, Luiz Frederico B. Vasconcelos, B. Lopes, and Yuri C. da Silva Ribeiro.** "Energy function and unstable solutions by the means of an augmented Jacobian." *Applied Mathematics and Computation* 206, no. 1 (2008): 154-163.
- Torres, Geraldo Leite, and Victor Hugo Quintana.** "An interior-point method for nonlinear optimal power flow using voltage rectangular coordinates." *Power Systems, IEEE Transactions on* 13, no. 4 (1998): 1211-1218.
- Torres, Geraldo L., and Victor H. Quintana.** "On a nonlinear multiple-centrality-corrections interior-point method for optimal power flow." *Power Systems, IEEE Transactions on* 16, no. 2 (2001): 222-228.
- Vieira Filho, Xisto.** *Operação de sistemas de potencia com controle automatico de geração*. Campus, 1984.
- Wollenberg, B., and A. Wood.** "Power generation, operation and control." John Wiley&Sons, Inc (1996): 264-327.