

AVALIAÇÃO DE METODOLOGIAS PARA REPRESENTAÇÃO DA REGULAÇÃO PRIMÁRIA DE FREQUÊNCIA NO PROBLEMA DE FLUXO DE POTÊNCIA ATRAVÉS DO MÉTODO DE NEWTON COMPLETO

PRISCILA C. C. DOS SANTOS¹, JOÃO A. PASSOS FILHO¹, PAULA O. LA GATTA^{1,2}, RICARDO M. HENRIQUES¹

*Departamento de Energia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora¹
Rua José Lourenço Kelmer, s/n, São Pedro, Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil
E-mails: priscila.cristine@engenharia.ufjf.br, jopass@ieee.org,
paulalg@cepel.br, henriques@ieee.org*

*Departamento de Redes Elétricas, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica²
Av. Horácio de Macedo, 354, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil*

Abstract— This paper has as main objective the implementation and evaluation of four methodologies to represent the primary frequency regulation in the power flow problem, solved by the full Newton method. The four methodologies studied are presented in detail, especially highlighting its equations and the Jacobian matrix formation of the problem. In this work the MATLAB[®] environment were used to implement the evaluated methodologies. The methodologies were validated from the study of the 39-Bus New England test system. From the studies and results, it was possible to identify the positive and negative aspects of each studied methodology.

Keywords— Power flow, primary control, Newton method, control devices, frequency control.

Resumo— Este artigo tem como objetivo principal a implementação e avaliação de quatro metodologias para representação da regulação primária de frequência no problema de fluxo de potência, resolvido pelo método de Newton completo. As quatro metodologias estudadas são apresentadas de forma detalhada, destacando principalmente seu equacionamento e a formação da matriz Jacobiana do problema. Neste trabalho utilizou-se o ambiente MatLab[®] para implementação das metodologias avaliadas. As metodologias foram validadas a partir do estudo do sistema teste *New England* de 39 barras. A partir dos estudos realizados e resultados obtidos foi possível identificar os pontos positivos e negativos de cada metodologia estudada.

Palavras-chave— Fluxo de potência, regulação primária, método de Newton, dispositivos de controle, controle de frequência.

1 Introdução

O fluxo de potência é a ferramenta computacional mais utilizada e citada na análise de Sistemas Elétricos de Potência (SEP). Sua metodologia básica consiste na determinação das tensões nodais, em módulo e ângulo, considerando que são dados os parâmetros e a topologia da rede, além de um cenário de carga e geração (Stott, 1974) (Monticelli, 1983). É amplamente utilizado como um estudo em si ou como parte de estudos mais complexos, tais como planejamento da expansão e da operação, estabilidade, análise de contingências, confiabilidade, segurança de tensão, entre outros.

A avaliação de regime permanente dos sistemas a partir das premissas clássicas do estudo do fluxo de potência é feita, como dito anteriormente, a partir de uma dada e específica condição de carga e geração e determina, ao fim do processo iterativo, uma condição de operação tal que a frequência do sistema se mantém no seu valor nominal. Além disso, qualquer desbalanço entre a carga, perdas elétricas e geração ativa é absorvido pela barra de referência (barra *swing* ou *slack*) (Monticelli, 1983). A barra de referência é geralmente escolhida entre os geradores de maior capacidade de geração sendo normalmente localizada na região central do sistema e também tem a função de estabelecer a referência angular.

Porém, na realidade da operação dos sistemas, as cargas nos diversos barramentos variam a cada ins-

tante, fazendo com que o estado de equilíbrio carga/geração seja constantemente alterado, necessitando de sistemas de controle que restabeleçam o estado de equilíbrio original. Este equilíbrio é feito a partir do sistema de controle de carga-frequência em que as unidades geradoras dos sistemas participam, variando a sua geração para atenderem à constante variação da demanda total. Além disso, na fase primária deste controle, o restabelecimento do equilíbrio é obtido com o desvio da frequência de seu valor nominal, ou seja, ao fim dos transitórios do sistema sob o controle na fase primária, dita Regulação (ou Controle) Primária de Carga-Frequência, o valor da frequência de operação em regime permanente é diferente do valor nominal.

Desta forma, é possível notar que a modelagem da barra de referência, como descrita na formulação clássica do fluxo de potência, carrega dificuldades na avaliação e reprodução de pontos de operação reais que representem de forma satisfatória as condições de operação. Adicionalmente, a ausência da monitoração da frequência de operação do sistema, mesmo em estudos de ferramentas de regime permanente, pode torná-lo impreciso e até mesmo incompleto, dependendo do escopo do estudo.

A partir deste contexto, foram propostas na literatura duas metodologias para representação da regulação primária de frequência no problema de fluxo de potência. A primeira metodologia foi proposta em (Liu, et al., 2009) e a segunda em (La Gatta, 2012). Apesar

de utilizarem as mesmas equações e objetivos de controle, sua estratégia de implementação no método de Newton é diferente, como será destacado posteriormente na apresentação das metodologias.

Tendo-se em vista o que foi exposto, este artigo tem como objetivo e contribuição principal a implementação e avaliação de quatro alternativas para representação da regulação primária de frequência no problema de fluxo de potência, resolvido pelo método de Newton completo. Serão avaliadas as duas metodologias descritas anteriormente e duas adicionais que são propostas neste trabalho. As quatro metodologias são apresentadas na Seção 3. Neste trabalho utilizou-se o ambiente MatLab® para implementação das metodologias avaliadas e propostas. Todas as metodologias foram validadas a partir do estudo do sistema *New England* de 39 barras.

2 Regulação Primária de Carga-Frequência

O regulador de velocidade é um dispositivo de controle que, ao atuar em cada gerador de um sistema, fornece condições necessárias para a realização da Regulação Primária, cuja função caracteriza a primeira fase do Controle de Carga-Frequência dos Sistemas de Potência. Este regulador detecta a variação de velocidade angular da turbina, e assim, modifica proporcionalmente a potência mecânica de saída de forma a compensar a variação de carga (Vieira Filho, 1984) (Kundur, et al., 1994) (Wood & Wollenberg, 2006).

Existem dois tipos de reguladores de velocidade: (i) reguladores isócronos; (ii) reguladores com queda de velocidade. A teoria acerca dos reguladores isócronos foge ao escopo do artigo, pois não possui participação satisfatória em sistemas com mais de uma unidade geradora (Vieira Filho, 1984) (Kundur, et al., 1994). Assim, este trabalho abordará apenas o regulador com queda de velocidade, cujo diagrama de blocos típico pode ser visto através da Figura 1.

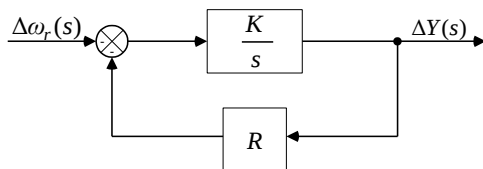


Figura 1. Diagrama de blocos do reg. com queda de velocidade

Na Figura 1 $\Delta\omega_r(s)$ representa a variação de velocidade angular, sendo a entrada do controlador e $\Delta Y(s)$ é a saída da malha de controle e representa a variação da posição da válvula da turbina, sendo ambas definidas no domínio da frequência complexa s . As constantes K e R são os ganhos do regulador. Pode ser demonstrado (Vieira Filho, 1984) (Kundur, et al., 1994) que a característica de regime permanente do regulador da Figura 1 é representada através da equação (1). Esta equação corresponde a uma equação de reta que passa pelo ponto (P_{G_0}, f_0) , ou seja, em um caso na qual a potência gerada pela máquina

P_{G_0} corresponde a uma frequência de operação do sistema f_0 . O gráfico que representa essa equação de reta pode ser visto na Figura 2. O subscrito "v" classifica o parâmetro corresponde ao gerador operando a vazio, "0" representa valores nominais e "pc" representa valores à plena carga.

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

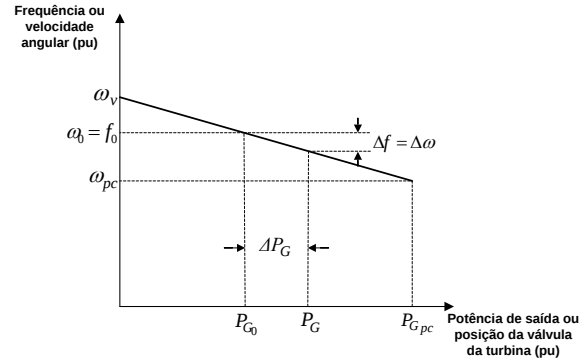


Figura 2. Característica estática do regulador de velocidade

A definição formal do estatismo R presente no diagrama de blocos da Figura 1 e na equação (1) 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_{pc}), expresso em p.u. da velocidade nominal (frequência f_0) (Vieira Filho, 1984), e está apresentada em (2).

$$R_{p.u.} = \frac{f_v - f_{pc}}{f_0} \quad (2)$$

O estatismo R é uma medida da participação de cada máquina do sistema nas perdas e na variação de carga (Vieira Filho, 1984) (Kundur, et al., 1994). Ou seja, na operação de um sistema com mais de uma máquina geradora que contenha regulador com queda de velocidade, a escolha do valor do estatismo decide a repartição de geração num cenário de desbalanço de potência ativa.

3 Metodologias Avaliadas

A seguir são apresentadas, de uma forma sucinta, as quatro metodologias utilizadas para representação da regulação primária de frequência no problema de fluxo de potência.

A equação (3) mostra de uma forma genérica a matriz Jacobiana expandida, que será necessária para o desenvolvimento das metodologias 1, 2 e 3. É importante destacar que as submatrizes H , N , M e L representam as derivadas parciais das equações de potência em relação às variáveis de estados originais do problema, conforme mostrado em (4). As submatrizes A , B , C , D e E representam as novas derivadas

das equações originais e adicionais em relação às variáveis de estado originais (V e θ) e adicionais e serão especificadas em cada metodologia que será apresentada, conforme mostrado em (5). $\Delta \underline{Y}$ é o vetor que representa os resíduos das equações adicionais e o vetor $\Delta \underline{F}$ as novas variáveis de estados do problema, de forma se ter o mesmo número de equações e variáveis. Além disso, variáveis escalares são representadas em itálico, matrizes em itálico e em negrito, e os vetores em itálico sublinhados.

$$\begin{bmatrix} \Delta \underline{P} \\ \Delta \underline{Q} \\ \Delta \underline{Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N} & \mathbf{A} \\ \mathbf{M} & \mathbf{L} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} & \mathbf{E} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \underline{\theta} \\ \Delta \underline{V} \\ \Delta \underline{F} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{H} = \frac{\partial \underline{P}}{\partial \underline{\theta}}; \mathbf{N} = \frac{\partial \underline{P}}{\partial \underline{V}}; \mathbf{M} = \frac{\partial \underline{Q}}{\partial \underline{\theta}}; \mathbf{L} = \frac{\partial \underline{Q}}{\partial \underline{V}} \quad (4)$$

$$\mathbf{A} = \frac{\partial \underline{P}}{\partial \underline{F}}; \mathbf{B} = \frac{\partial \underline{Q}}{\partial \underline{F}}; \mathbf{C} = \frac{\partial \underline{Y}}{\partial \underline{\theta}}; \mathbf{D} = \frac{\partial \underline{Y}}{\partial \underline{V}}; \mathbf{E} = \frac{\partial \underline{Y}}{\partial \underline{F}} \quad (5)$$

3.1 Metodologia 1

Esta metodologia foi proposta em (La Gatta, 2012), consistindo em modificar a representação das barras de geração no sistema de equações lineares a ser resolvido pelo método de Newton no problema de Fluxo de Potência, em coordenadas polares. É importante destacar que esta metodologia abrange todas as barras de geração, ou seja, tanto as barras PV quanto a(s) barra(s) V θ .

Para a modificação da representação das barras de geração, a equação que representa a característica estática do regulador de velocidade descrita na Seção 2, conforme (1), é inserida no sistema de equações do fluxo de potência, com a finalidade de fazer a distribuição de geração de potência ativa entre as barras geradoras do sistema de acordo com o valor do estatismo R do regulador de velocidade de cada máquina. Como as barras do tipo V θ também terão sua representação no fluxo de potência modificada é inserida a equação (6) com a finalidade de manter a referência angular do sistema no valor especificado θ^{ref} . Assim, o sistema de equações a ser resolvido terá dimensão $(2nb + ng + 1)$, onde nb é o número de barras do sistema, ng é o número de barras de geração.

$$\theta - \theta^{ref} = 0 \quad (6)$$

A equação (7) mostra a formação dos resíduos e as variáveis de estado adicionais, conforme representação genérica mostrada na equação (3). Os resíduos são formados pelo negativo das equações adicionais definidas pela equação (1), ΔP_{G_i} representa a geração de potência ativa no gerador i e f representa a frequência do sistema.

$$\Delta \underline{Y} = [\Delta y_1 \quad \Delta y_2 \quad \dots \quad \Delta y_{ng} \quad \Delta y_{(ng+1)}]^t \quad (7)$$

$$\Delta \underline{F} = [\Delta P_{G_1} \quad \Delta P_{G_2} \quad \dots \quad \Delta P_{G_{ng}} \quad \Delta f]^t$$

3.2 Metodologia 2

Esta metodologia é baseada em uma modificação da metodologia 1, que foi brevemente apresentada no item anterior. A modificação proposta consiste na substituição da variável de estado $\Delta \theta$ da barra de referência angular pela variável de estado Δf . Assim, o sistema de equações a ser resolvido terá dimensão $(2nb + ng)$.

As equações a seguir, definidas em (8), mostram a formação dos resíduos e as variáveis de estado adicionais, conforme representação genérica mostrada na equação (3). É importante destacar que as submatrizes $\mathbf{H}$, $\mathbf{M}$ e $\mathbf{C}$ devem ser corrigidas de forma a se considerar a alteração da variável de estado.

$$\begin{aligned} \Delta \underline{Y} &= [\Delta y_1 \quad \Delta y_2 \quad \dots \quad \Delta y_{ng}]^t \\ \Delta \underline{F} &= [\Delta P_{G_1} \quad \Delta P_{G_2} \quad \dots \quad \Delta P_{G_{ng}}]^t \end{aligned} \quad (8)$$

$$\Delta \underline{\theta} = \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \vdots \\ \Delta \theta_{ref} \\ \vdots \\ \Delta \theta_{nb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \vdots \\ \Delta f \\ \vdots \\ \Delta \theta_{nb} \end{bmatrix}$$

3.3 Metodologia 3

Esta metodologia consiste em representar a equação (1) de cada gerador de forma similar à representação de modelagem de carga pelo modelo ZIP no problema de fluxo de potência (Kundur, et al., 1994). A potência ativa gerada de cada barra de geração é calculada da seguinte forma:

$$P_G = P_{G_0} - \frac{1}{R} \cdot (f - f_0) \quad (9)$$

E o resíduo de potência ativa é reescrito da forma mostrada por (10).

$$\begin{aligned} \Delta P_i &= P_i^{esp} - P_i^{cal} = P_{G_i} - P_{D_i} - P_i^{cal} \therefore \\ \Delta P_i &= P_{G_0}^i - \frac{1}{R_i} \cdot (f - f_0) - P_{D_i} - P_i^{cal} \end{aligned} \quad (10)$$

A referência angular é representada da mesma forma que a metodologia 1, ou seja, pela inclusão da equação (6). A equação (11) mostra a formação dos resíduos e as variáveis de estado adicionais, conforme

representação genérica mostrada na equação (3). Assim, o sistema de equações a ser resolvido terá dimensão $(2nb + 1)$.

$$\Delta \underline{Y} = [\Delta y_1]^t \text{ e } \Delta \underline{F} = [\Delta f]^t \quad (11)$$

3.4 Metodologia 4

Esta metodologia foi proposta originalmente em (Liu, et al., 2009). Neste caso não são inseridas equações adicionais na formulação do problema. A proposta consiste em se considerar as potências ativas geradas da mesma forma como mostrado na metodologia 3 e em se fazer a substituição da variável de estado $\Delta \theta$ da barra de referência pela variável de estado Δf , da mesma forma como descrito na metodologia 2. Desta forma, a equação (12) mostrada a seguir resume de uma forma genérica esta metodologia.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \vdots \\ \Delta P_{ref} \\ \vdots \\ \Delta P_{nb} \\ \vdots \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial f} & \dots & H_{1nb} & \vdots \\ \vdots & \ddots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ H_{ref1} & \dots & \frac{\partial P_{ref}}{\partial f} & \dots & H_{refnb} & \vdots \\ \vdots & \dots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ H_{nbl} & \dots & \frac{\partial P_{nb}}{\partial f} & \dots & H_{nbnb} & \vdots \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ \underline{M}_1 & \dots & 0 & \dots & \underline{M}_{nb} & \underline{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \vdots \\ \Delta f \\ \vdots \\ \Delta \theta_{nb} \\ \vdots \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (12)$$

4 Identificação de Singularidade de Submatrizes

Na seção anterior foram descritas quatro metodologias para a representação da regulação primária de geradores no problema de fluxo de potência. Tais metodologias diferem entre si na estratégia de inclusão das novas equações que descrevem o comportamento em regime permanente dos reguladores de velocidade. Além disso, é preciso considerar a frequência do sistema como variável a ser obtida.

Esta seção tem por objetivo principal avaliar o comportamento da submatriz H das quatro metodologias em estudo. Esta análise é importante, pois caso esta submatriz seja singular durante o processo de fatoração da matriz Jacobiana, torna-se necessária a permutação das linhas da matriz Jacobiana de forma a se evitar o aparecimento de um pivô nulo e a ocorrência de problemas numéricos.

É importante destacar que este tipo de problema poderia ser naturalmente mitigado pela utilização de um critério de ordenação da fatoração da matriz Jacobiana, como por exemplo, o critério de Tinney 2 (Tinney, 1972). Contudo, avalia-se que esta análise é importante para sistemas acadêmicos e tutoriais de pequeno e médio porte, pois nestes casos é possível a solução dos problemas sem a utilização de um critério de ordenação. Além disso, permite uma análise

detalhada dos impactos da representação das equações da regulação primária de frequência na formulação de um programa de fluxo de potência.

Essa análise da dependência linear entre as colunas da matriz Jacobiana durante o processo de fatoração foi proposta por (Montagna & Granelli, 1995) com o objetivo de detecção de ilhamento (falta de barra de referência angular) durante o processo de fatoração. Desta forma, neste caso é visto que:

$$\sum_{j \in S} \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} = 0 \text{ e } \sum_{j \in S} \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} = 0 \quad (13)$$

onde:

- P_i : Equação de pot. ativa injetada na barra i ;
- Q_i : Equação de pot. reativa injetada na barra i ;
- θ_j : Ângulo da tensão da barra j ;
- S : Conjunto de todas as barras do sistema.

A equação (13) implica que o somatório das colunas das derivadas parciais em relação aos ângulos das barras é zero. Portanto, a falta de referência angular pode levar a esta situação de forma similar ao que ocorre em um ilhamento devido a uma contingência. Por outra lado, utilizando-se a nomenclatura definida em (Monticelli, 1983), também pode ser verificado que:

$$H_{km} + H_{kk} = 0 \text{ e } M_{km} + M_{kk} = 0 \quad (14)$$

5 Resultados

Para avaliação das quatro metodologias descritas anteriormente foi utilizado o sistema *New England* (Christie, 1994) de 39 barras em duas situações. O primeiro estudo é referente ao sistema em suas condições de operação originais e objetiva-se avaliar a solução e trajetória de convergência de cada metodologia. No segundo estudo o sistema será modificado considerando-se uma variação de 100 % em algumas barras de forma a se forçar um desbalanço entre carga e geração do sistema e consequentemente tirar a frequência de seu valor nominal.

Este sistema possui 10 barras de geração, onde as máquinas conectadas em cada barra foram modeladas como um gerador síncrono, com base de potência de 1000 MVA e regulador com queda de velocidade com ganho de 5 % na base da máquina. Na base do sistema (100 MVA), todas as máquinas terão estatismo de 0,5 %. A Figura 3 mostra a topologia deste sistema.

5.1 Análise da Solução do Problema

Inicialmente foram comparados os resultados de frequência e tensão, em módulo e ângulo para as

quatro metodologias estudadas. Em todos os casos foi possível obter a solução para o fluxo de potência do sistema *New England* e os resultados foram idênticos, com uma frequência de 60,0 Hz.

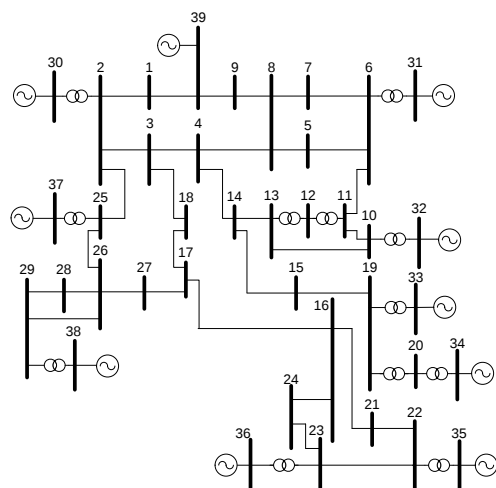


Figura 3. Topologia do sistema *New England*

Além da comparação das variáveis de estado, também foram analisados os resultados da trajetória de convergência. A trajetória de convergência foi exatamente a mesma para as quatro metodologias. A Tabela 1 mostra a evolução dos resíduos máximos de potência ativa e reativa em função das iterações do problema. Desta forma, pode-se afirmar que todas as metodologias são equivalentes em relação à trajetória de convergência do método de Newton, onde se observou a manutenção da característica de convergência quadrática do problema. A tolerância adotada para os resíduos de potência ativa, reativa e demais equações foi de 10^{-5} p.u.. As condições iniciais são as mesmas dos dados originais deste sistema.

Tabela 1. Resíduos máximos de potência ativa e reativa - Original

Número da Iteração	$\ \Delta P\ _{\infty}$ (p.u.)	$\ \Delta Q\ _{\infty}$ (p.u.)
1	2,6087	0,3126
2	0,0035	0,0105
3	4,1741e-06	4,0416e-06

Tabela 2. Comparação dos dados de carga

Número da Barra	Carga original		Carga modificada	
	(MW)	(Mvar)	(MW)	(Mvar)
4	500,0	193,0	1000,0	386,0
8	522,0	176,0	1044,0	352,0
20	680,0	103,0	1360,0	206,0
39	1104,0	250,0	2208,0	500,0

Tabela 3. Resíduos máximos de pot. ativa e reativa - Modificado

Número da Iteração	$\ \Delta P\ _{\infty}$ (p.u.)	$\ \Delta Q\ _{\infty}$ (p.u.)
1	10,9258	2,1434
2	1,1154	0,8674
3	0,1170	0,0288
4	8,2267e-04	1,1818e-04
5	3,1701e-08	4,6748e-09

Com o objetivo de avaliar o comportamento da metodologia fora das condições de operação originais, a carga do sistema foi modificada com o objetivo de

forçar um desbalanço entre carga e geração. Desta forma, optou-se pelo aumento de 100 % das cargas conectadas nas barras 4, 8, 20 e 39, como indicado na Tabela 2, como proposto em (La Gatta, 2012).

A variação de 100 % nas cargas gerou uma redução na frequência do sistema para 59,1205 Hz e uma variação nos valores de tensão, mas mantendo os mesmos resultados para as quatro metodologias. A Tabela 3 faz uma comparação da trajetória de convergência do cálculo dos fluxos de potência para o proposto. A tolerância de convergência utilizada foi a mesma que a análise do caso base e foram utilizadas as mesmas condições iniciais do caso original para o estudo do sistema modificado.

A Figura 4 mostra a comparação da geração de potência ativa de cada gerador do sistema. É possível verificar que ΔP_G foi o mesmo para cada gerador. Isto se deve pela utilização dos mesmos dados de estatismo e base de potência para cada gerador. Desta forma, cada gerador assumiu o mesmo montante de potência no desbalanço entre carga e geração.

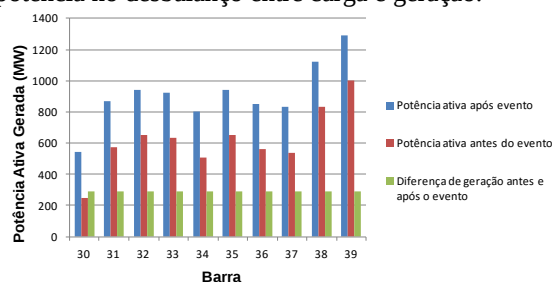


Figura 4. Comparação entre as potências ativas geradas

Uma das diferenças entre as metodologias estudadas é que nas metodologias 1 e 3 é possível utilizar como condição inicial para valor de ângulo de referência valores diferentes do especificado. Nas demais metodologias é sempre necessário se iniciar o processo já no valor especificado devido à substituição da variável de estado $\Delta\theta$ da barra de referência por Δf .

Também é importante destacar que em (La Gatta, 2012) foi feita uma validação da representação da regulação primária de geradores no problema de fluxo de potência em relação aos valores de regime permanente obtidos a partir de uma programação de transientes eletromecânicos. Naquele trabalho utilizou-se uma versão acadêmica do programa ANATEM, desenvolvido pelo CEPEL, e os resultados demonstraram a validade deste tipo de modelagem.

5.2 Análise da Ordem de Pivoteamento

Nesta segunda avaliação procurou-se verificar a necessidade de utilização de uma rotina de fatoração com permutação, de forma a se tratar a obtenção de um pivô nulo durante o processo de fatoração.

Neste sentido, utilizou-se o programa MatLab® para esta avaliação. As quatro metodologias foram desenvolvidas neste ambiente e a ordem de fatoração da rotina de fatoração LU foi utilizada para comparação. As Tabelas 4, 5 e 6 mostram a ordem de fatoração

das metodologias 1, 2 e 3, respectivamente. É possível verificar a troca da ordem, onde a última equação de potência ativa foi ordenada por último (metodologias 1 e 3) e teve sua ordem trocada com a equação de referência angular. Na metodologia 2 a troca foi feita em relação à primeira equação adicional. O motivo para esta troca é a singularidade da submatriz H , conforme descrito anteriormente. A metodologia 4 foi a única metodologia em que a troca não foi necessária e os resultados não foram apresentados por este motivo.

Tabela 4. Ordem de fatoração – Metodologia 1

Número da Barra									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
81	82	83	84	85	86	87	88	89	--

Tabela 5. Ordem de fatoração – Metodologia 2

Número da Barra									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
71	72	73	74	75	76	77	78	80	39
81	82	83	84	85	86	87	88		--

Tabela 6. Ordem de fatoração – Metodologia 3

Número da Barra									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
71	72	73	74	75	76	77	78	39	

6 Conclusão

Esse artigo teve como objetivo principal a implementação e avaliação de quatro metodologias para representação da regulação primária de frequência no problema de fluxo de potência em coordenadas polares, resolvido pelo método iterativo de Newton completo.

A partir deste contexto, foi possível verificar que todas as metodologias são capazes de representar de forma adequada a regulação primária dos geradores do sistema. Em relação à trajetória de convergência e solução, pode-se verificar que todas apresentam o mesmo resultado. Contudo, devido à singularidade da submatriz H , foi verificada a necessidade de permutação de linhas da matriz Jacobiana durante o

processo de fatoração nas três primeiras metodologias. A quarta metodologia, que foi baseada na referência (Liu, et al., 2009), apresentou o mesmo comportamento em termos de solução e não foi necessária a permutação durante o processo de fatoração.

Desta forma, é possível concluir que esta metodologia seria adequada para implementação em programas computacionais que não têm o tratamento de pivôs nulos durante o processo de fatoração. Contudo, é importante destacar que este tipo de problema poderia ser naturalmente mitigado pela utilização de um critério de ordenação na fatoração da matriz Jacobiana. A desvantagem nesta metodologia, bem como da metodologia 2, é que o valor da referência angular deve ser sempre inicializado no processo iterativo de solução com seu valor especificado.

Agradecimentos

O primeiro e segundo autores agradecem à FAPEMIG pelo apoio financeiro.

Referências Bibliográficas

- Christie, R., 1994. [Online] Available at: <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/> [Accessed 24 05 2016].
- Kim, Y., Song, H. & Lee, B., 2009. *Governor-response power flow (GRPF) based long-term voltage stability simulation*. s.l., s.n., pp. 1-4.
- Kundur, P., Balu, N. & Lauby, M., 1994. *Power system stability and control*. s.l.:McGraw-hill New York.
- La Gatta, P. O., 2012. *Um novo modelo para representação de regulação primária e secundária de frequência no problema de fluxo de potência e Fluxo de Potência Otimo*, Juiz de Fora: Dissertação de M.Sc., Programa de Pós-graduação em Elétrica - Universidade Federal de Juiz de Fora.
- Liu, Y. H., Wu, Z., Lin, S. & Brandon, N. P., 2009. *Application of the power flow calculation method to islanding micro grids*. s.l., s.n., pp. 1-6.
- Montagna, M. & Granelli, G. P., 1995. Detection of Jacobian singularity and network islanding in power flow computations. *IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 142(6), pp. 589-594.
- Monticelli, A. J., 1983. *Fluxo de carga em redes de energia elétrica*. s.l.:E. Blucher.
- Stott, B., 1974. Review of load-flow calculation methods. *Proceedings of the IEEE*, 62(7), pp. 916-929.
- Tinney, W. F., 1972. Compensation methods for network solutions by optimally ordered triangular factorization. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, Issue 1, pp. 123-127.
- Vieira Filho, X., 1984. *Operação de Sistemas de Potência com Controle Automático de Geração*. s.l.:Campus.
- Wood, A. & Wollenberg, B., 2006. *Power Generation Operation & Control*. s.l.:John Wiley & Sons.