

Tratamento de Limites de Geração de Potência Reativa no Problema de Fluxo de Potência Utilizando Análise de Sensibilidade na Formulação de Critérios de *Backoff*

G. F. Silva, UFJF, R. M. Henriques, *Senior Member, IEEE*, J. A. Passos Filho, *Senior Member, IEEE* e F. R. M. Alves, *Member, IEEE*

Resumo -- Este artigo traz uma metodologia complementar acerca do tratamento de limites de geração de potência reativa na solução do fluxo de potência. A implementação realizada incorpora na rotina de *backoff* a análise de sensibilidade QV de todos os geradores, como parte dos critérios que devem ser avaliados no processo de reespecificação do tipo da barra, uma vez atingido o limite de potência reativa. O principal objetivo do trabalho é aperfeiçoar o algoritmo convencional, propiciando o tratamento adequado dos pontos de operação dos geradores onde a sensibilidade QV é negativa, comportamento este que usualmente não é abordado na modelagem clássica deste tipo de controle. Através da proposição de alguns sistemas tutoriais é possível constatar a existência da sensibilidade QV negativa, bem como a atuação do algoritmo proposto nesta condição.

Palavras-chave -- Limites de Potência Reativa, Fluxo de Potência, Sensibilidade QV.

I. INTRODUÇÃO

O estudo do fluxo de potência (ou de carga) é o pilar de toda análise relacionada a sistemas elétricos de potência, quaisquer que sejam seus estágios (planejamento, pré-operação, operação em tempo real), oferecendo condições operativas que fomentam estudos particulares, tais como, estabilidade eletromecânica ou a pequenas perturbações, análise de contingências e de faltas, segurança de tensão, confiabilidade e operação otimizada.

Para que a modelagem do fluxo de potência reproduza o sistema real de forma mais fidedigna possível, é necessário que dispositivos e estratégias de controle sejam incluídas na resolução do método de *Newton-Raphson*. Neste trabalho, o controle a ser incluído na solução matemática do problema de fluxo de potência é o tratamento de limites de geração de potência reativa dos geradores. Em termos práticos, os limites físicos dos geradores (máximo e mínimo) quanto à geração de potência reativa se tornam os valores máximo e mínimo dos valores calculados desta grandeza para os geradores durante o processo iterativo.

Sabe-se que o controle de tensão está fundamentado no acoplamento existente entre as variáveis Q (potência reativa) e V (magnitude da tensão). Portanto, através do ajuste do valor da injeção de potência reativa é possível controlar a tensão da barra conectada ao gerador. Porém, em uma dada iteração do método de *Newton-Raphson*, as barras de geração que atingirem um dos seus limites mínimo ou máximo de potência reativa serão convertidas para o mesmo tipo das barras de carga, em virtude da perda do controle de tensão. No entanto, na iteração seguinte, é necessário que se verifique a possibilidade de tais barras regressarem ao seu estado original. A este processo de retorno dá-se o nome de *backoff*.

As condições de atuação da rotina de *backoff* descrito em [1] abordam exclusivamente os casos em que a sensibilidade QV dos geradores é positiva, ou seja, havendo um acréscimo de injeção de potência reativa, provoca-se o crescimento da magnitude da tensão. Da mesma forma, um decréscimo de injeção de potência reativa, resulta em diminuição da magnitude da tensão da barra controlada pelo gerador. Dessa forma, havendo barras de geração que estejam no limite e que apresentem características de sensibilidade QV negativa, este algoritmo atuaria de forma inadequada. Desta forma casos de fluxo de potência que tem solução e que possuem barras de geração com sensibilidade QV negativa, se forem submetidos a esta estratégia de controle convencional, apresentarão resultados inconsistentes ou divergentes.

Assim este trabalho propõe uma implementação do tratamento de limite de potência reativa complementar à convencional [1,2], em que a sensibilidade QV do gerador se torna um novo parâmetro condicional da rotina de *backoff* e ainda soluciona adequadamente os casos em que geradores estejam operando em pontos de sensibilidade QV negativa.

II. FLUXO DE POTÊNCIA E O CONTROLE DE TENSÃO EM BARRAS DO TIPO PV

Na solução do fluxo de potência pelo método das injeções de potência são conhecidas as equações de potências ativa e reativa associadas a cada tipo de barra definidos na formulação do problema descrita em [1], que propõe o sistema matemático linearizado de acordo com Eq. 1.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = J \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (1)$$

G. F. Silva, R. M. Henriques and J. A. Passos Filho are with Federal University of Juiz de Fora, Juiz de Fora CEP: 36.036-330, MG, Brazil (e-mail's: guilherme.faria@engenharia.ufjf.br, henriques@ieee.org and jopass@ieee.org).

F. R. M. Alves is with CEPEL, Rio de Janeiro CEP: 21.944-370, RJ, Brazil (e-mail: frma@cepel.br).

Na Eq. 1 os vetores $\Delta \underline{P}$ e $\Delta \underline{Q}$ são os resíduos das equações de injeção de potência ativa e reativa. O maior valor destes vetores em cada iteração é submetido ao critério de convergência adotado no método de *Newton-Raphson*, enquanto os vetores $\Delta \underline{V}$ e $\Delta \underline{\theta}$ são os incrementos das variáveis tensão e ângulo nodais. A matriz J representa a matriz Jacobiana da formulação tradicional, a qual é responsável pela linearização da solução. A expressão matemática que restringe e habilita a atuação do controle referente ao tratamento dos limites de potência reativa é a Eq. 2, onde k é uma barra pertencente ao Sistema Elétrico de Potência (SEP), Q_k é a geração de potência reativa da barra k , e Q_k^{min} e Q_k^{max} representam os limites desta geração de potência reativa.

$$Q_k^{min} \leq Q_k \leq Q_k^{max} \quad (2)$$

Para a ativação do controle de limite de potência reativa, adota-se, por exemplo, um critério referente ao valor máximo dos resíduos de $\Delta \underline{Q}$. Este critério tem a finalidade de tornar o método mais estável na ativação e desativação do controle, fazendo com que este atue somente em regiões próximas à convergência, ou seja, quando o maior resíduo de $\Delta \underline{Q}$ for menor que 4ε , onde ε é o critério de erro para a solução do método iterativo de *Newton-Raphson*.

Sobre a estratégia de controle propriamente dita, descrita em [1], a rotina para a entrada no controle adota que na iteração em que Q_k é superior ao seu Q_k^{max} , o valor da potência reativa gerada nesta barra assume este limite. Semelhantemente, se a potência reativa gerada é inferior a Q_k^{min} , o valor de geração desta barra se torna Q_k^{min} . Ambos os casos tratam-se de limites de geração violados. Nestas situações, as barras de geração onde são verificados estes comportamentos, tornam-se barras de carga (PQ), em que o valor de Q_k especificado é aquele assumido após a violação (máximo ou mínimo). Assim, sendo esta barra agora classificada como PQ, sua tensão torna-se variável e passa a ser calculada a cada passo do processo iterativo.

Na iteração seguinte, faz-se necessário a verificação se as barras violadas podem retornar ao seu tipo original (PV). A este processo dá-se o nome de *backoff*. Ressalta-se que o algoritmo é estendido também aos geradores classificados como barras de referência (Vθ). As condições dessa rotina estão resumidamente descritas a seguir, sendo que V_{esp} é o valor de tensão especificada para os geradores e V_{calc} , o valor atual calculado da tensão da barra que está no limite.

Para $Q_k = Q_k^{max}$:

- Se $V_{calc} < V_{esp}$. A barra mantém-se PQ.
- Se $V_{calc} > V_{esp}$. A barra retorna a ser PV.

Para $Q_k = Q_k^{min}$:

- Se $V_{calc} > V_{esp}$. A barra mantém-se PQ.
- Se $V_{calc} < V_{esp}$. A barra retorna a ser PV.

III. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E CURVA QV

Na rotina que compõe o tratamento de limites de geração descrita anteriormente, observa-se que esta possui uma limitação que deve ser discutida. Constata-se que este mecanismo não atua de forma adequada (divergindo ou oferecendo resultados inconsistentes) em casos de pontos de operação em que as barras PV apresentem o comportamento invertido quanto ao acoplamento QV (sensibilidade negativa). Como alternativa a este inconveniente, foi proposto que a sensibilidade QV compusesse um dos parâmetros a serem atendidos na reespecificação de barras violadas (*backoff*) [3].

De acordo com [4], define-se a partir do sistema linearizado original do fluxo de carga, e assumindo $\Delta \underline{P} = 0$, devido ao fraco acoplamento entre $\underline{P}$ e $\underline{V}$, resolve-se o sistema seguinte de acordo com a Eq. 3 a fim de se obter a sensibilidade QV das barras do SEP.

$$\begin{bmatrix} \Delta \underline{P} \\ \Delta \underline{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} \Delta \underline{\theta} \\ \Delta \underline{V} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Solucionando e evidenciando o vetor de tensões nodais na Eq. 3, chega-se a:

$$\Delta \underline{Q} = (J_{QV} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV}) \Delta \underline{V} = J_{RQV} \Delta \underline{V} \quad (4)$$

$$\Delta \underline{V} = J_{RQV}^{-1} \Delta \underline{Q} \quad (5)$$

Da Eq. 4 obtém-se a Eq. 5 e define-se então que, para uma variação positiva de 1 p.u. no k -ésimo elemento do vetor $\Delta \underline{Q}$, a sensibilidade QV é positiva se no k -ésimo elemento do vetor $\Delta \underline{V}$ for obtida uma variação também positiva. Caso a variação colhida no k -ésimo elemento do vetor $\Delta \underline{V}$ seja negativa, então a sensibilidade QV será negativa. O k -ésimo elemento será escolhido dentre as barras do tipo PV existentes no sistema elétrico de potência modelado.

Graficamente pode-se obter também a sensibilidade do gerador por meio do levantamento da curva QV da barra ligada a este [5]. A sensibilidade QV pode ser determinada numericamente através da derivada desta curva no ponto de operação, conforme a Figura 1.

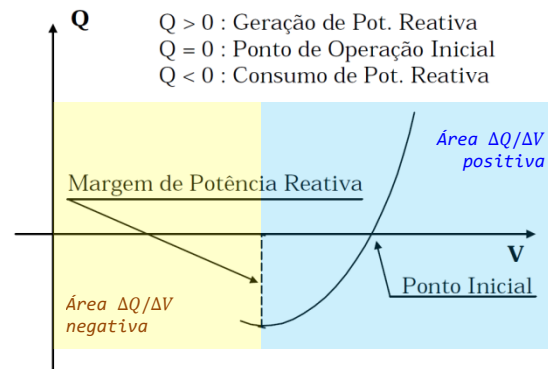


Figura 1 - Exemplo de curva QV

Para que a análise de sensibilidade QV componha os critérios da rotina de *backoff*, basta que se determine o sinal da derivada da curva QV no ponto de operação. Para condições

de operação situados à esquerda do ponto de mínimo, observa-se a ocorrência de sensibilidade negativa. À direita, localizam-se os pontos de sensibilidade positiva. Este sinal vem através da relação existente na Eq. (5).

A partir da identificação do sinal da sensibilidade das barras violadas, pode-se incluir tal parâmetro no algoritmo de *backoff* e então, tratar cada um dos casos de sensibilidade adequadamente, diferentemente do que sugere a rotina convencional.

IV. METODOLOGIA PROPOSTA

A Figura 2 ilustra, a partir de um fluxograma, a metodologia que engloba a solução do fluxo de carga para ambas as sensibilidades na operação dos geradores. É importante salientar que a rotina de entrada do tratamento de limites é similar àquela da modelagem tradicional. Porém torna-se necessário que se crie um novo bloco destinado exclusivamente aos geradores violados com sensibilidade QV negativa no interior do processo de retorno, o qual conterá também as seguintes condições quanto à reespecificação. Para $Q_k = Q_k^{max}$:

- Se $V_{calc} < V_{esp}$. A barra retorna a ser PV.
- Se $V_{calc} > V_{esp}$. A barra mantém-se PQ.

Para $Q_k = Q_k^{min}$:

- Se $V_{calc} < V_{esp}$. A barra mantém-se PQ.
- Se $V_{calc} > V_{esp}$. A barra retorna a ser PV.

V. RESULTADOS

Nos resultados utilizam-se sistemas tutoriais para se evidenciar a sensibilidade QV negativa, bem como a atuação da estratégia de controle discutida até aqui na solução do fluxo de potência, em comparação com a metodologia convencional. O algoritmo foi desenvolvido via ambiente MATLAB®, e o programa ANAREDE [6], desenvolvido pelo Centro de Pesquisas em Energia Elétrica (CEPEL), foi utilizado como referência da solução, e ainda viabilizou a análise de sensibilidade e a obtenção da região do ponto de operação na curva QV. Salientando que nas tabelas referentes à solução, o valor ε é a tolerância do erro de potência ativa e reativa aplicada ao método de *Newton-Raphson*.

A. Caso 1-Sistema Teste de 3 Barras com Compensação Série

Os dados deste SEP estão nas TABELAS I e II e a solução do fluxo de carga está na TABELA III. A topologia deste sistema é apresentada através do diagrama unifilar da Figura 3. A presença de um sistema de compensação série em um ramo ($X_{1-2}(\%) = -0,915$) pode representar uma condição de operação típica de sensibilidade QV negativa.

TABELA I
DADOS DE BARRAS – CASO 1

Barra	Tipo	P(MW)	Q(Mvar)	V(p.u.)	Ang.(°)
1	Vθ	-	-	1,0	0,0
2	PQ	0	0	-	-
3	PQ	1000	0	-	-

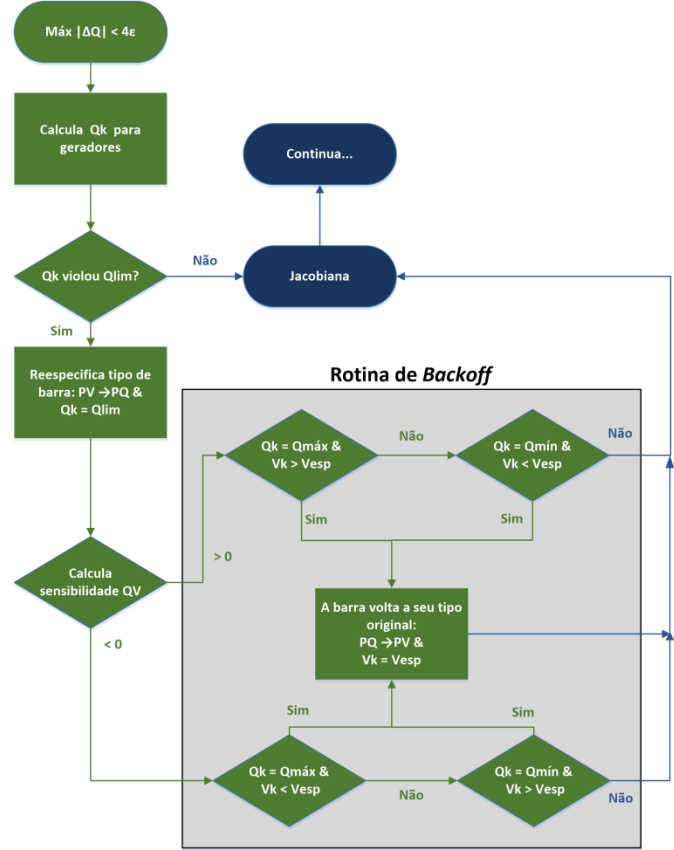


Figura 2 - Fluxograma da metodologia proposta para o tratamento do limite de reativo em geradores

TABELA II
DADOS DE LINHA – CASO 1

De	Para	R(%)	X(%)	b ^{sh} (Mvar)
1	2	0	-0,915	0
2	3	0,072	1,75	877,5

TABELA III
SOLUÇÃO DO CASO 1, SEM LIMITE DE REATIVOS E $V_1 = 1,0$ P.U. ($\varepsilon = 10^{-6}$)

Barra	P(MW)	Q(Mvar)	V(p.u.)	Ang.(°)
1	1008,7	-744,0	1,000	0,0
2	0,0	0,0	0,936	5,70
3	-1000,0	0,0	0,987	-5,40

Reespecificando-se a tensão do gerador da barra 1 para 1,05 p.u., deseja-se analisar a sensibilidade entre Q e V. Assim, após a solução, comprova-se que a potência gerada na barra 1 foi igual a -839,4 Mvar.



Figura 3 - Topologia do sistema de 3 barras – Caso 1

Comparando-se as soluções do fluxo de potência com as duas especificações de tensão da barra 1, observa-se um

comportamento invertido no acoplamento QV, visto que uma variação positiva na tensão especificada do gerador da barra 1 provocou uma variação negativa na potência reativa absorvida, evidenciando a ocorrência de sensibilidade negativa na barra analisada. A partir das ferramentas de análise de sensibilidade e levantamento da curva QV disponíveis no programa ANAREDE, foi também possível constatar a natureza da sensibilidade QV, conforme mostram a Figura 4 e a Figura 5. Na Figura 4 destaca-se em vermelho o valor negativo da sensibilidade $\Delta Q_1/\Delta V_1$, ou seja, para uma variação positiva da tensão há uma variação negativa da potência reativa injetada. Já na Figura 5 é ressaltado que no levantamento da curva QV o ponto de operação encontra-se no lado esquerdo (“ESQ”) da curva.

NUM.	BARRA NOME	GERACAO MVAR	SENSIB QG/VG	VARIABEL VG=MIN LIM	DEPENDENTE VG=MAX LIM
1	Barra01--1GR	-744.1	-1878.8	-368.3	-1119.8

Figura 4 - Sensibilidade barra 1 - Caso 1 (ANAREDE)

Num.	Barra Nome	Are Tp	Tensao pu	Geracao Mvar	Limite de Reativo Tensao Mvar	Lado
1	Barra01--1GR	1 2	1.000	-744.1	1.990 -2566.5	ESQ

Figura 5 - Resultado para curva QV – Caso 1 (ANAREDE)

A intenção do próximo cenário é resolver o fluxo de potência sob a atuação do controle, visto que anteriormente os geradores não eram limitados por quaisquer valores de geração de potência máxima ou mínima. Assim especifica-se a tensão da barra 1 em 1,0 p.u. novamente e sua potência reativa mínima igual a -700 Mvar. Submetendo-se ao algoritmo convencional, o processo diverge. Sob a metodologia proposta, desenvolvida no ambiente MATLAB, a solução é convergente, apresentando os resultados presentes na TABELA IV.

TABELA IV
SOLUÇÃO DO CASO 1, $Q_{\min} = -700$ MVAR E $V_1 = 1,0$ P.U. ($\epsilon = 10^{-6}$)

Barra	P(MW)	Q(Mvar)	V(p.u.)	Ang.(°)
1	1009,0	-700,0	0,976	0,0
2	0,0	0,0	0,915	5,9
3	-1000,0	0,0	0,963	-5,7

B. Caso 2-Sistema Teste de 3 Barras sem Compensação Série

O SEP a ser discutido neste tópico tem seus dados elétricos referentes às barras e linhas nas TABELAS V e VI. Sua topologia está representada através do diagrama unifilar da Figura 6.

TABELA V
DADOS DE BARRA – CASO 2

Barra	Tipo	P(MW)	Q(Mvar)	V(p.u.)	Ang.(°)
1	V0	-	-	1,0	0,0
2	PQ	0	0	-	-
3	PQ	700	0	-	-

A respectiva solução para o fluxo de carga sem considerar os valores limites de potência reativa na geração é apresentada na TABELA VII.

TABELA VI
DADOS DE LINHA – CASO 2

De	Para	R(%)	X(%)	b ^{sh} (Mvar)	Tap
1	2	0,34095	3,9751	415,2	-
2	3	-	1,22	0	1,0

TABELA VII
SOLUÇÃO DO CASO 2, SEM LIMITE DE REATIVOS E $V_1 = 1,0$ P.U. ($\epsilon = 10^{-6}$)

Barra	P(MW)	Q(Mvar)	V(p.u.)	Ang.(°)
1	717,7	-144,1	1,000	0,0
2	0,0	0,0	0,992	-16,6
3	-700,0	0,0	0,988	-21,6



Figura 6 - Topologia do sistema de 3 barras – Caso 2

Assim como no caso 1, reespecifica-se o valor da tensão da barra 1 em 1,05 p.u. e executa-se novamente o fluxo de carga sem a especificação dos limites físicos dos geradores quanto a potência reativa. A solução indica que a geração da barra 1 agora assume o valor de -223,9 Mvar. Conclui-se, mais uma vez, que o gerador apresenta a sensibilidade QV invertida. O incremento de 0,05 p.u. na tensão especificada provocou uma queda de -79,8 Mvar na absorção da potência reativa. Por intermédio dos recursos disponíveis no programa ANAREDE, comprova-se esta sensibilidade QV através da Figura 7 e Figura 8. Em destaque estão o valor negativo da sensibilidade e a indicação do ponto de operação do gerador da barra 1 no lado esquerdo da curva QV.

NUM.	BARRA NOME	GERACAO MVAR	SENSIB QG/VG	VARIABEL VG=MIN LIM	DEPENDENTE VG=MAX LIM
1	Barra01--1GR	-144.1	-1675.7	191.0	-479.2

Figura 7 – Sensibilidade barra 1 – Caso 2 (ANAREDE)

Num.	Barra Nome	Are Tp	Tensao pu	Geracao Mvar	Limite de Reativo Tensao Mvar	Lado
1	Barra01--1GR	1 2	1.000	-144.1	1.850 -1261.4	ESQ

Figura 8- Resultado para curva QV – Caso 2 (ANAREDE)

A terceira situação a ser considerada é reestabelecendo a tensão da barra 1 em 1,0 p.u. e limitando sua capacidade reativa em -100 Mvar, forçando a atuação do controle, visto que nestas mesmas condições de especificação de tensão, a barra em questão absorve -144 Mvar, valor inferior ao mínimo especificado para tal circunstância. Nesta condição de habilitação do controle pela rotina convencional o processo diverge. Na metodologia proposta, a solução do fluxo de carga é apresentada na TABELA VIII.

TABELA VIII
SOLUÇÃO DO CASO 2, $Q_{\min} = -100$ MVAR E $V_1 = 1,0$ P.U. ($\epsilon = 10^{-6}$)

Barra	P(MW)	Q(Mvar)	V(p.u.)	Ang.(°)
1	718,8	-100,0	0,974	0,0
2	0,0	0,0	0,954	-17,6
3	-700,0	0,0	0,951	-23,0

C. Caso 3- Sistema Teste de 4 Barras

O objetivo deste exemplo é mostrar, sob o ponto de vista da sensibilidade QV, como o aumento da distância elétrica de um gerador pode causar uma mudança na sensibilidade QV de outras barras. Considere um sistema de 4 barras, com os seus respectivos dados elétricos apresentados nas TABELAS IX e X.

TABELA IX
DADOS DE BARRA – CASO 3

Barra	Tipo	P(MW)	Q(Mvar)	V(p.u.)	Ang.(°)
1	PV	700,0	-	1,0	-
2	PQ	0	0	-	-
3	PQ	700,0	0	-	-
4	Vθ	-	-	1,0	0,0

TABELA X
DADOS DE LINHA – CASO 3

De	Para	R(%)	X(%)	b^{sh} (Mvar)	Tap
1	2	0,34095	3,9751	415,2	-
2	3	-	1,22	0	1,0
2	4	-	0,001	-	-

A solução do fluxo de carga, considerando os geradores sem os limites de geração de potência reativa, está na TABELA XI. A topologia deste sistema está representada através do diagrama unifilar da Figura 9

TABELA XI
SOLUÇÃO DO CASO 3, SEM LIMITE DE REATIVOS E $V_1 = 1,0$ P.U. ($\epsilon = 10^{-6}$)

Barra	P(MW)	Q(Mvar)	V(p.u.)	Ang.(°)
1	700,0	-169,2	1,000	16,1
2	0,0	0,0	1,000	0,0
3	-700,0	0,0	0,996	-4,9
4	16,8	9,6	1,000	0,0

A fim de constatar a sensibilidade QV neste sistema, resolve-se o fluxo de carga com a tensão do gerador da barra 1 especificada em 1,05 p.u. e obtém-se um consumo de reativos de -66,2 Mvar. O aumento da tensão especificada proporcionou uma variação positiva na absorção de potência reativa na barra em questão, o que comprova a ocorrência de um sistema que apresenta sensibilidade QV positiva, conforme

validam as informações obtidas via programa ANAREDE exibidas na Figura 10 e Figura 11. Na Figura 10 o relatório da sensibilidade $\Delta Q_1 / \Delta V_1$ mostra um valor positivo, que confirma o resultado do fluxo de carga para a tensão especificada em 1,05 p.u.. Também o relatório na Figura 11 demonstra que o gerador da barra 1 encontra-se no lado direito da curva QV (“DIR”), que é a região de sensibilidade positiva.

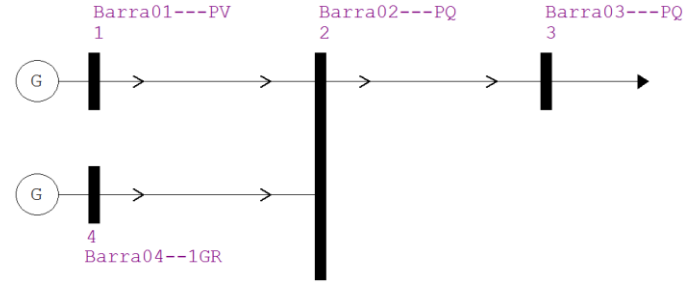


Figura 9 - Topologia do sistema de 4 barras – Caso 3

BARRA	GERACAO	SENSIB	VARIABEL	DEPENDENTE
NUM.	NOME	MVAR	QGVG	VG=MIN LIM VG=MAX LIM
4	Barra04--1GR	-123.8	-2664.6	542.3 -523.5
1	Barra01---PV	-66.2	2180.8	-611.4 I 260.9 S

Figura 10 - Sensibilidade barra 1 – Caso 3 (ANAREDE)

X	-----X-----X-----X																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					</
---	--------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	----

Figura 11 - Resultado para curva QV – Caso 3 (ANAREDE)

Limitando-se a injeção de potência reativa do gerador da barra 1 em -100 Mvar e redefinindo sua tensão em 1,0 p.u., o controle atua de forma correta e com resultados idênticos, se sujeito à as modelagens com e sem sensibilidade, conforme demonstra a TABELA XII a seguir.

TABELA XII
SOLUÇÃO DO CASO 3, $Q_{\min} = -100$ MVAR E $V_1 = 1,0$ P.U. E $X_{2-4} = 0,001\%$ ($\epsilon = 10^{-3}$)

Barra	P(MW)	Q(Mvar)	V(p.u.)	Ang.(°)
1	700,0	-100,0	1,034	15,4
2	0,0	0,0	1,000	0,0
3	-700,0	0,0	0,996	-4,9
4	16,1	-81,8	1,000	0,0

Admite-se agora que a reatância da linha que interliga a barra 4 à barra 2 seja elevada para 10%, promovendo um afastamento elétrico da barra 4 em relação ao sistema, mantendo as condições anteriores ($Q_{\min} = -100$ Mvar e $V_1 = 1,0$ p.u.). Ao se fazer esta alteração, provoca-se uma inversão da sensibilidade da barra 1, tornando-a negativa. No entanto tal fato não é obstáculo ao algoritmo proposto, que obtém a solução exposta na TABELA XIII.

TABELA XIII
SOLUÇÃO DO CASO 3, $Q_{\min} = -100$ MVAR, $V_1 = 1,0$ P.U. E $X_{2-4} = 10\%$ ($\epsilon = 10^{-4}$)

Barra	P(MW)	Q(Mvar)	V(p.u.)	Ang.(°)
1	700,0	-100,0	0,887	19,1
2	0,0	0,0	0,888	-1,4
3	-700,0	0,0	0,883	-7,6
4	21,4	112,1	1,000	0,0

A prova da inversão da sensibilidade após o aumento da reatância entre as barras 2 e 4 também pode ser constatada através das funcionalidades de sensibilidade e curva QV do programa ANAREDE, conforme demonstram a Figura 12 (sensibilidade) e a Figura 13 (curva QV).

BARRA	GERACAO	SENSIB	VARIABEL	DEPENDENTE
NUM.	NOME	MVAR	QG/VG	VG=MIN LIM VG=MAX LIM
4 Barra04--1GR	3.5	-915.2	186.5	-179.6
1 Barra01--PV	-160.7	-389.2	-82.9	-238.6 I

Figura 12 - Sensibilidade barra 1 – caso 3 com $X_{2-4} = 10\%$ (ANAREDE)

Barra	Tensao	Geracao	Limite de Reativo
Num.	Nome	Are Tp	pu Mvar Tensao Mvar Lado
1 Barra01--PV	1 1	1.000	-160.7 1.240 -42.2 ESQ

Figura 13 - Resultado para curva QV – caso 3 com $X_{2-4} = 10\%$ (ANAREDE)

Nota-se que quando a análise de sensibilidade se torna parâmetro integrante e condicional da rotina de reespecificação do tipo de barra para os geradores, é possível promover a correta diferenciação do tratamento de limites aplicado a cada uma das sensibilidades existentes. Este exemplo ilustra que um aumento da reatância da linha entre as barras 2 e 4 resultou na inversão da sensibilidade QV da barra 1 (PV). Isto demonstra que certas alterações na rede podem levar o sistema a trabalhar em regiões factíveis do ponto de vista operacional, porém não devidamente abordados na proposta tradicional de tratamento de limites de potência reativa dos geradores na formulação de fluxo de potência.

VI. CONCLUSÕES

A inclusão da análise de sensibilidade QV como condição integrante da rotina de *backoff* potencializa o método convencional através da construção de uma rotina complementar à original, abordando um comportamento anteriormente não previsto em sua definição.

Em sua estruturação não foram necessárias grandes mudanças em relação ao algoritmo base. Através da linearização já existente no método de *Newton-Raphson*, se faz a inclusão do cálculo da análise de sensibilidade. Além da inclusão da sensibilidade, foi criado um novo bloco condicional que avalia a natureza da sensibilidade e que é responsável pelo tratamento da sensibilidade negativa dentro da rotina de *backoff*. Este novo bloco segue premissas exatamente opostas àquelas já conhecidas e utilizadas para o acoplamento QV positivo.

Dessa forma, o funcionamento da estratégia de controle para o tratamento de limites de potência reativa não fica limitado a solucionar apenas o caso particular de acoplamento QV positivo, mas se adequa a condição de acoplamento QV

negativo, que a solução do fluxo de carga nos três casos tutoriais apresentados demonstra ser factível. A não inclusão desta análise de sensibilidade na rotina de *backoff* pode resultar na não obtenção do ponto de operação do sistema em estudo, levando o método a uma divergência equivocada.

A implementação correta do controle de limites de potência reativa no método de solução de fluxo de potência deve agregar esta consideração de sensibilidade para que, independente do ponto de operação, a solução considerando os limites reativos seja alcançada.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] A. Monticelli, *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*, 1 ed., São Paulo, Editora Edgard Blucher Ltda, 1983.
- [2] J. A. Passos Filho, “Modelagem e Incorporação de Dispositivos de Controle no Problema de Fluxo de Potência”, Dissertação de Mestrado, UFJF, Juiz de Fora, MG, Brasil, Julho, 2000.
- [3] L. O. M. Mendonça, “Reavaliação do Tratamento de Limites de Potência Reativa no Problema de Fluxo de Potência”, Trabalho de Fim de Curso, UFJF, Juiz de Fora, MG, Brasil, Dezembro, 2010.
- [4] P. Kundur, *Power System Control and Stability*, EPRI-Power System Engineering Series, McGraw-Hill Inc, 1994.
- [5] J. C. R. Ferraz, “Fluxo de Potência Continuo e Análise Modal na Avaliação da Estabilidade de Tensão de Sistemas de Grande Porte”, Dissertação de Mestrado, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Agosto, 1998.
- [6] CEPEL, Programa de Análise de Redes - ANAREDE, Manual do Usuário, Versão 10.01.00, Rio de Janeiro RJ, Setembro, 2015.

VIII. BIOGRAFIAS

Guilherme de Faria Silva Possui graduação em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (2015). Atualmente ocupa o cargo de servidor público como Técnico laboratório/Eletrotécnica da Universidade Federal de Juiz de Fora. Formou-se em Técnico em Eletrotécnica pelo Colégio Técnico Universitário de Juiz de Fora (2008). Atuou como estagiário na CEMIG Distribuição S/A (CEMIG D) na área de avaliadores de desempenho de redes de distribuição da região da Zona da Mata e Campo das Vertentes.

Ricardo M. Henriques (M'2004, SM'2015) Possui graduação em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF (1996) e mestrado e doutorado em engenharia elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ/COPPE (2002 e 2009). Foi pesquisador por 16 anos do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL – de 1997 a 2013, atuando no desenvolvimento de modelos e aplicações computacionais para análise de redes elétricas, com ênfase no Programa ANAREDE. Atualmente é professor Adjunto II na Faculdade de Engenharia da UFJF. Atualmente vem pesquisando sobre análise de segurança estática e dinâmica (VSA/DSA) e aplicações computacionais para SEP.

João A. Passos Filho (M'2007, SM'2012) Possui graduação e mestrado em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF (1995 e 2000) e doutorado em engenharia elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ/COPPE (2005). Trabalhou no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), atuando principalmente no desenvolvimento de programa de análise de redes em regime permanente. Atualmente é professor Adjunto IV da Faculdade de Engenharia na UFJF. Tem experiência na área de engenharia elétrica, com ênfase em desenvolvimento de modelos computacionais, atuando principalmente nos seguintes temas: análise de redes em regime permanente, segurança de tensão e otimização de sistemas potência.

Flávio R. de Miranda Alves (M'1992) Possui graduação em engenharia elétrica pela Universidade Federal Fluminense - UFF (1986), mestrado em engenharia de sistemas de computação e doutorado em engenharia elétrica, ambos pela UFRJ/COPPE (1992 e 2007). É pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL – desde 1987, atuando no desenvolvimento de modelos e aplicações computacionais para análise de redes elétricas. Tem experiência com ênfase em desenvolvimento de modelos computacionais, principalmente em: ambientes integrados de interface gráfica e banco de dados para operação e planejamento de sistemas elétricos de potência, metaheurísticas e recomposição de sistemas elétricos de potência.