



XXII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

BR/GAT/21
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO - IV

GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT

MÉTODO ROBUSTO PARA O CÁLCULO DO MÁXIMO CARREGAMENTO DE SISTEMAS DE POTÊNCIA DE GRANDE PORTE

Carlos E. Xavier(*)

Manfred F. Bedriñana

Carlos A. Castro

UNICAMP

RESUMO

Este trabalho apresenta um método robusto para o cálculo do máximo carregamento, o qual se caracteriza pela obtenção de sucessivas aproximações do ponto de máximo carregamento usando carregamentos infactíveis, além da aplicação de uma técnica de redução do carregamento baseada nas características geométricas na superfície fronteira de máximo carregamento. É definida uma margem de erro admissível como critério de convergência, a qual é determinada pelo operador de rede. As adequações tratam de tornar o método robusto, melhorando a convergência para sistemas de grande porte, e prático no sentido de sua aplicação segundo os critérios do ONS, como o aumento de carga por áreas previamente definidas.

PALAVRAS-CHAVE

Análises de Fluxo de Carga, Ponto de Máximo Carregamento, Estabilidade de Tensão, Otimização de passo.

1.0 - INTRODUÇÃO

Os estudos elétricos realizados através de simulações são importantes para o planejamento e operação dos sistemas de potência. Em particular, os aspectos relativos à segurança da operação correspondem ao foco deste trabalho. A Figura 1.1 ilustra os estados de operação de sistemas de potência do ponto de vista da segurança [1]. As transições entre os estados de operação podem ocorrer tanto em consequência de perturbações no sistema (transições ditas involuntárias) como devido a ações de controle (transições voluntárias), algumas das quais constituem funções específicas dos centros de monitoração e controle.

A transição **Seguro** → **Alerta** ocorre devido a uma contingência, ou mesmo à evolução normal da demanda, e uma ou mais restrições de segurança deixam de ser atendidas. **Alerta** → **Seguro** corresponde a uma transição resultante da execução da função de controle de segurança (*modo corretivo*) realizada pelo centro de controle. A transição **Seguro** → **Seguro** resulta da definição de ações de controle visando a segurança de operação de um ponto de operação futuro. **Alerta** → **Emergência** é uma transição decorrente da ocorrência de contingências tais que as violações resultantes implicam na necessidade de corte de carga. Medidas de controle apropriadas fazem o sistema voltar ao estado seguro (transição **Alerta** → **Seguro**). Em **Emergência** → **Alerta**, o sistema pode sair do estado de emergência pela atuação do *controle de emergência*, nos modos corretivos ou de crise. **Emergência** → **Restaurativo** corresponde a uma transição que consiste no religamento de cargas/circuitos para mitigar a situação de emergência. Na transição **Alerta** → **Alerta**, o operador poderá lançar mão da função controle de emergência atuando no *modo preventivo*, visando a mudar o ponto de operação atual do sistema de tal forma que, para o estado previsto, não se verifique mais a emergência detectada anteriormente. **Restaurativo** → **Alerta** consiste em

(*) Rua Albert Einstein, 400 Caixa Postal 6101 – CEP 13083-852, Campinas, SP – Brasil
Tel / Fax: (+55 19) 3521-3866 – Email: eng_carloseduardo@live.com

religar as cargas e os circuitos do sistema, desligados durante uma emergência, tentando colocar o sistema de volta ao estado seguro ou, pelo menos no estado alerta.

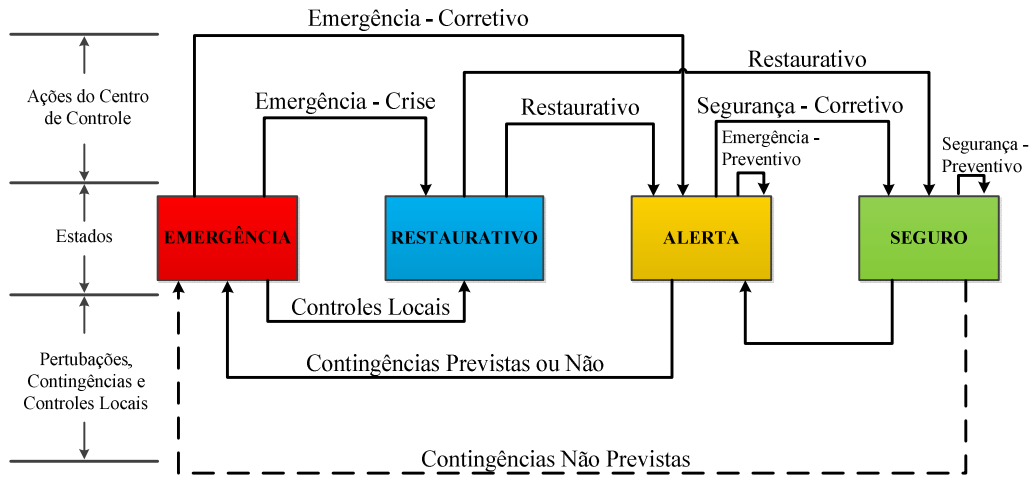


Figura 1.1 – Estados de Operação [1].

A segurança de tensão tem sido um dos aspectos mais importantes para a detecção das condições de instabilidade de tensão, as quais podem apresentar-se na proximidade do Ponto de Máximo Carregamento (PMC). O PMC é uma condição limite de incremento de carga em uma área estudada. Normalmente os estudos de determinação do PMC consideram que o fator de potência da carga é mantido constante e o aumento de carga é seguido por redespacho dos geradores para fazer frente ao aumento de carga. A Figura 1.2 ilustra a característica do PMC utilizando uma curva PV. Nesta figura o PMC (P_k^{cr}) corresponde a P2. Os pontos P1 e P3 são pontos de operação estáveis, podendo o ponto P3 estar próximo de seus limites mínimos de tensão, devido sua proximidade ao P_k^{cr} .

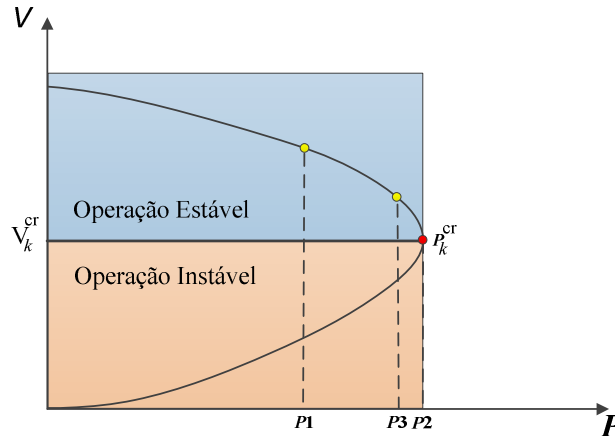


Figura 1.2 – Característica do PMC a partir de uma curva PV.

No Brasil, as diretrizes e os critérios dos estudos elétricos resultam da experiência obtida pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), como mencionado em [2]. Nos estudos de segurança de tensão, define-se uma margem de segurança de tensão (MST) como a distância mínima entre o ponto de operação do sistema e o PMC. Um sistema elétrico é considerado seguro em relação à tensão quando, para uma dada condição operativa, a MST e os níveis de tensão pré-contingência e pós-contingência encontram-se em conformidade com os critérios estabelecidos.

De forma geral, o ONS recomenda o uso de técnicas estáticas na definição de margens de segurança, na seleção de contingências críticas e na identificação de áreas e controles críticos. Na prática, os programas de fluxo de carga continuado [3] são utilizados para o cálculo do PMC, os quais podem consumir muito tempo de processamento ainda mais na operação em tempo real de sistemas de grande porte, como o sistema brasileiro. Outros métodos baseados em algoritmos de fluxo de carga não divergentes podem realizar o cálculo do PMC de maneira mais rápida e eficiente [4].

Este trabalho apresenta adequações e melhoramentos ao método desenvolvido em [5], o qual se caracteriza pela obtenção de sucessivas aproximações do PMC usando carregamentos infactíveis, além da aplicação de uma

técnica de redução do carregamento baseada nas características geométricas na superfície fronteira de máximo carregamento. É definida uma margem de erro admissível como critério de convergência, definida pelo operador de rede. As adequações visam tornar o método mais robusto, melhorando a convergência para sistemas de grande porte, e prático, no sentido de sua aplicação segundo os critérios da ONS, como o aumento de carga por áreas previamente definidas.

2.0 - CÁLCULO DO MÁXIMO CARREGAMENTO

Os métodos baseados em algoritmos de fluxo de carga não divergentes podem realizar o cálculo do PMC de maneira mais rápida e eficiente [4]. Nesta seção será proposto um método prático e rápido para o cálculo do PMC utilizando o Fluxo de Carga com Otimização de Passo (FCOP) e técnicas de redução do carregamento.

2.1 O Problema de fluxo de carga

As equações de fluxo de carga podem ser formuladas como:

$$g(x, \rho) = 0, \quad (2.1)$$

onde, x é o vetor das variáveis de estado correspondentes do sistema, i.e. magnitude de tensão e ângulos de fase das barras $\theta \in \mathbb{R}^{nPQ+nPV}$ e $V \in \mathbb{R}^{nPQ}$, respectivamente; nPQ and nPV são os números de barras PQ e PV, respectivamente; $\rho \in \mathbb{R}$ é o parâmetro denominado fator de carregamento; $g(x, \rho)$ correspondem aos mismatches de potência ativa e reativa das barras, $\Delta P \in \mathbb{R}^{nPQ+nPV}$ e $\Delta Q \in \mathbb{R}^{nPQ}$, respectivamente.

O aumento de carga é proporcional ao caso base, usando somente o fator de carregamento ρ . O redespacho da geração é proporcional ao aumento de carga, portanto, a geração de potência é aumentada proporcionalmente ao aumento de carga. A equação (2.1) pode ser escrita como:

$$\Delta P_i(x, \rho) = \{P_{esp,cb,i} + (\rho - 1)\beta_k P_{esp,cb,i}\} - P_{cal,i}(x), \quad (2.2)$$

$$\Delta Q_i(x, \rho) = \{Q_{esp,cb,i} + (\rho - 1)\beta_k Q_{esp,cb,i}\} - Q_{cal,i}(x). \quad (2.3)$$

O termo entre chaves correspondem aos valores especificados $P_{esp,i}(\rho)$ e $Q_{esp,i}(\rho)$, e os subscritos *esp* e *cal* refere-se aos termos especificados e calculados, respectivamente; o caso base (*cb*) é definido para $\rho = 1$; β_k é igual a um quando o fator de aumento de carga é aplicado para barra i pertencente a área k , e zero caso contrário. As potências especificadas são definidas como: $P_{esp,cb,i} = P_{g,cb,i} - P_{c,cb,i}$ e $Q_{esp,cb,i} = Q_{g,cb,i} - Q_{c,cb,i}$, onde g e c são os termos associados para geração e carga, respectivamente.

2.2 O fluxo de carga com otimização de passo

O fluxo de carga com otimização de passo (FCOP) é um fluxo de carga não divergente que, quando aplicado para uma condição de carregamento maior que o PMC, ou seja, para um sistema infactível, fornece uma solução de PMC, porém com outra direção de aumento de carga, ao invés de divergir.

Os métodos de fluxos de carga convencionais podem não apresentar resultados satisfatórios para sistemas mal condicionados. Nestes casos, estes métodos podem apresentar convergência lenta ou mesmo divergir, o que não é uma situação desejável do ponto de vista dos operadores dos sistemas, os quais não conhecem inicialmente o PMC do sistema para um ponto de operação dado. Além disso, é importante que programas comerciais forneçam informações adicionais para sistemas infactíveis. Para estas situações, o método prático proposto neste trabalho, poderia auxiliar programas como Anarede, usado pela maioria das concessionárias, e o Organon, usado pelo ONS, fornecendo informações relevantes do PMC. O fluxo de carga com otimização de passo (FCOP) foi inicialmente proposto em [6], considerando um modelo em que as tensões eram representadas em coordenadas retangulares. Em [7], utilizando um método considerando tensões em coordenadas polares foi proposto, o que permite a sua aplicação direta nos programas comerciais de fluxo de carga. O FCOP obtém a solução correta do sistema, ainda que esta esteja na proximidade da fronteira de factibilidade Σ , a direção desejada de acréscimo de carga e geração pode ser representada usando o vetor s_{esp} , que é o vetor unitário das potências especificadas de $S_{esp} = (P_{esp}, Q_{esp})$. Ao aplicar um fator de carregamento ρ grande o suficiente para tornar o sistema infactível, o método FCOP alcança uma solução sobre a fronteira Σ quando $\mu \rightarrow 0$, e esta solução é um PMC com uma direção de acréscimo de carga e geração diferente da desejada s_{esp} . A Figura 2.1 mostra o comportamento do processo do FCOP para alcançar PMCs com direções de acréscimo s_1 e s_2 considerando um ponto inicial *flat start* e algum outro, respectivamente. O ponto *flat start* representa a origem do espaço de parâmetros S_{esp} . Desde um fator de

carregamento ρ_1 grande, uma sequência de fatores de carregamento decrescentes ρ_2 pode ser aplicados, assim novos PMCs são alcançados, os quais convergem no PMC desejado quando ρ_2 se aproxima ao fator de carregamento desejado ρ^* . Em resumo, para $\rho > \rho^*$, o FCOP alcança algum PMC e para $\rho < \rho^*$, alcança um ponto de operação.

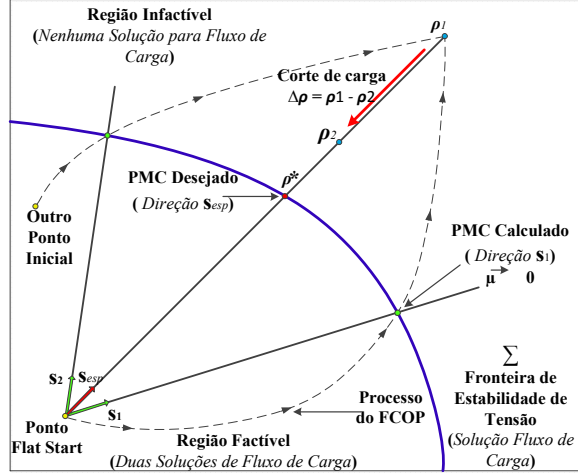


Figura 2.1 – Características do processo FCOP.

2.3 Técnica de Redução do Carregamento

Para um carregamento excessivo, FCOP alcança um PMC que é uma Bifurcação Sela-nó (BSN) ou oscila entre duas o mais BSNs. Em [8] demonstra-se que nas BSNs o autovetor à esquerda associado ao autovalor nulo do Jacobiano $\nabla_y g$ define uma direção normal à superfície fronteira Σ . O autovetor à esquerda w no ponto de BSN pode ser definido como:

$$\begin{aligned} \nabla_x g(x_{pmc})^T w &= 0, \\ \|w\|_2 &= 1, \end{aligned} \quad (2.4)$$

onde, x_{pmc} é o vetor das variáveis de estado no último PMC, $\|w\|_2$ é a norma euclidiana de w , logo, w é um vetor unitário.

A Figura 2.2 ilustra a técnica de redução do carregamento no espaço de parâmetros de geração e carga com controles e limites obtida de [4], porém, aplicada a áreas previamente definidas. Os resíduos de potência $\Delta S = (\Delta P, \Delta Q)$ obtidos pelo método FCOP no último PMC usando o ponto inicial *flat start* representam a distância (em MVA) entre o último PMC e S_{esp} . Realmente o processo FCOP tenta alcançar o ponto de mínimo $\|\Delta S\|_2$, porém, termina capturado pela fronteira Σ antes que isso de fato aconteça.

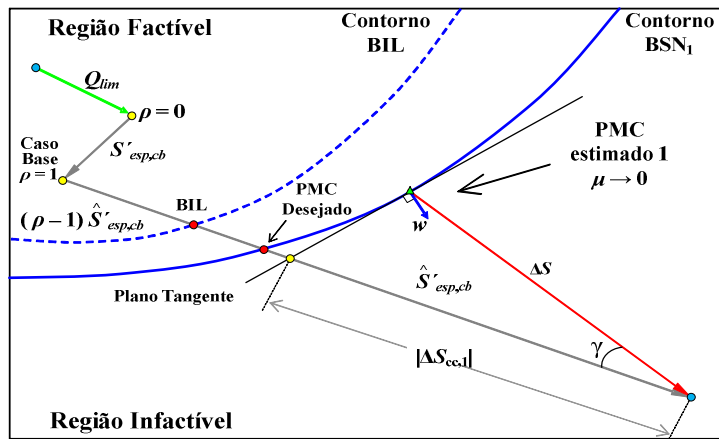


Figura 2.2 – Técnica de Redução de Carregamento.

O processo inicia-se com um carregamento inicial grande o suficiente (maior que o máximo) na direção de acréscimo de geração e carga $\{Q_{lim} + S'_{esp,cb} + (\rho - 1) \hat{S}_{esp,cb}\}$, de forma a configurar um sistema infactível, porém o método proposto neste trabalho pode ser aplicado para qualquer carregamento inicial para o cálculo do PMC, onde os componentes de $\hat{S}'_{esp,cb}$ da barra i que pertence à área k são dados por $\hat{P}'_{esp,cb,i} = \beta_k P'_{esp,cb,i}$ e $\hat{Q}'_{esp,cb,i} = \beta_k Q'_{esp,cb,i}$, β_k assume valor de 1 quando deseja-se o aumento de carga da área k e valor de 0 caso contrário. As potências

especificadas do caso base da barra i são definidas como $P'_{esp,cb,i} = P_{g,cb,i} - P_{c,cb,i}$ para as barras PQ e PV, e $Q'_{esp,cb,i} = Q_{g,cb,i} - Q_{c,cb,i}$, para as barras PQ. Caso a barra i tipo PV viole algum limite de geração de potência reativa mínimo ou máximo, define-se então $Q_{lim,i} = Q_{g,min,i}$ ou $Q_{lim,i} = Q_{g,max,i}$, respectivamente, e $Q'_{esp,cb,i} = -Q_{c,cb,i}$.

Uma redução de carregamento eficiente $\Delta S_{cc,1}$ é definido sobre uma superfície fronteira Σ contínua e convexa, assim $\Delta S_{cc,1}$ é definida pela interseção do plano tangente à superfície fronteira Σ no último PMC e a linha com direção $\{Q_{lim} + S'_{esp,cb} + (\rho - 1) \hat{S}_{esp,cb}\}$, (veja Figura 2.2).

Usando ΔS , w e propriedades geométricas no espaço de parâmetros $\hat{S}'_{esp,cb}$, $\Delta S_{cc,1}$ é calculado como:

$$\Delta S_{cc1} = \frac{\langle \Delta S, w \rangle}{\cos \gamma} \hat{S}'_{esp,cb}. \quad (2.5)$$

onde $\langle \Delta S, w \rangle$ é o produto escalar de ΔS e w (projeção de ΔS na direção de w); γ é o ângulo entre $\hat{S}'_{esp,cb}$ e w , assim $\cos \gamma = \langle \hat{S}'_{esp,cb}, w \rangle$. A variação do fator de carregamento $\Delta \rho$ é calculado como:

$$\Delta \rho = \frac{|\Delta S_{cc,1}|}{|\hat{S}'_{esp,cb}|} = \frac{\langle \Delta S, w \rangle}{\langle \hat{S}'_{esp,cb}, w \rangle}. \quad (2.6)$$

A nova estimativa ρ_{novo} é dado por $\rho_{novo} = \rho - \Delta \rho$. É importante ressaltar que em (2.6) assume que algumas das barras PV não exercem controle de tensão e sua representação é feita como uma barra PQ_{max} ou PQ_{min}. A Figura 2.3 ilustra o processo de cálculo do PMC. Começando com ρ^0 , o FCOP é executado levando ao PMC⁰, que é um PMC para direção de incremento de carga diferente da desejada. Utilizando [4], ρ^1 é obtido e um novo FCOP leva a PMC¹. O processo continua até que o PMC desejado seja obtido para a direção de incremento de carga definida.

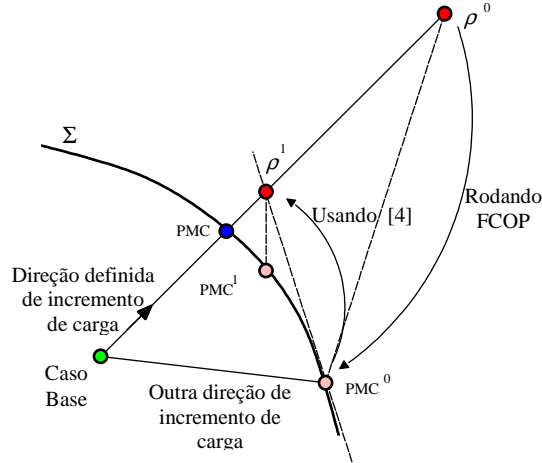


Figura 2.3 – Comportamento do FCOP Aplicando a Técnica de Redução do Carregamento.

3.0 - MÉTODO PROPOSTO

3.1 Método Prático Aplicado a Sistemas Divididos em Áreas

O método prático aplicado por áreas do sistema apresentado neste trabalho, utiliza as mesmas características de [5], porém, com algumas modificações principalmente relativas à trajetória de cálculo do PMC, onde se alcançou um melhor desempenho no cálculo global do PMC (menor número de iterações e cálculos de fluxo de carga). Estas modificações foram evidenciadas durante as centenas de simulações realizadas com redes teste do IEEE, redes reais de distribuição e transmissão, incluindo o Sistema Interligado Nacional Brasileiro (SIN). Do ponto de vista do operador, apenas ter o conhecimento do quão próximo se está do PMC já é suficiente para tomada de decisões necessárias para manter o sistema em operação. O método proposto em [5], utiliza as excelentes características de [4] e adiciona outras duas muito convenientes:

- Inclui-se a informação prática, geralmente definida por cada empresa, sobre o erro aceitável no resultado final do carregamento crítico.
- O desempenho do método não depende da escolha de um ponto de operação infactível. Portanto, a escolha de ρ inicial não se torna uma questão crítica neste caso.

Cada empresa deverá estipular uma margem de erro aceitável para sua rede de acordo sua experiência profissional e conhecimento da rede, representada neste trabalho por “ x ”. O valor que representará esta margem no algoritmo é o parâmetro α , que representa a largura de uma faixa de valores de carregamentos máximos aceitáveis. Como

exemplo, para uma margem de 5%, portanto, qualquer valor entre $0,95 \rho_{cr}$ e $1,05 \rho_{cr}$ é considerado como um bom resultado para efeitos práticos em relação ao monitoramento e controle. Figura 2.4 (a) ilustra a ideia do método, usando a conhecida curva PV. A Figura 2.4 (b) ilustra as possíveis situações durante o processo iterativo usando o método prático proposto neste trabalho.

A largura de faixa α pode ser escrita como:

$$\alpha = \left(1 + \frac{x}{100}\right) / \left(1 - \frac{x}{100}\right) \quad (2.7)$$

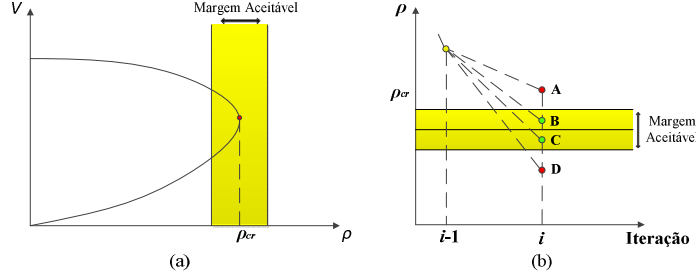


Figura 2.4 (a) – Margem Aceitável do ρ_{cr} ; (b) Ilustração do Processo Iterativo.

A partir de um ponto de operação obtido na iteração $(i-1)$, pode-se obter um novo ponto na iteração i através do método prático proposto aqui, levando a um novo ponto de operação. Os pontos A (infactível) e D (factível) são inaceitáveis, pelo fato de estarem fora da faixa aceitável pré-determinada. Por outro lado, os pontos B (infactível) e C (factível) são aceitáveis, já que estão dentro da faixa aceitável. Portanto, ρ_B e ρ_C fornecem uma boa estimativa prática do PMC e podem ser utilizados em processos de análise de segurança.

O método prático proposto neste trabalho pode ser entendido a partir do algoritmo descrito abaixo.

- I. Inicializar contador $i=0$. Definir um valor inicial para ρ^j , grande o suficiente para configurar uma situação de infactibilidade, definir a margem de erro $x\%$, definir as áreas β e ir para o passo II.
- II. Rodar um FCOP para ρ^j . Se o ponto estiver na região infactível, siga para o passo III. Caso contrário, fazer $\rho^{temp} = \rho^j$ e ir para o passo V;
- III. Com base em [4], estimar um novo valor de ρ^{temp} . Se $\rho^{temp} < 1$, ir para o passo IV, caso contrário, ir para o passo V;
- IV. Fazer $\rho^{temp} = 1$ e ir para o passo VI;
- V. Rodar um FCOP para ρ^{temp} . Se o ponto for infactível ir para o passo VII, se for factível ir para o passo VI;
- VI. $\rho^{i+1} = \rho^{temp} \cdot \alpha$. Rodar um FCOP para ρ^{i+1} . Se o ponto for infactível, a solução será $\rho_{pmc} = (\rho^{temp} + \rho^{i+1})/2$ e fim. Se não, incrementar o contador $i = i + 1$ e executar o passo VI novamente até obter um ponto infactível para encontrar a solução dada por $\rho_{pmc} = (\rho^{temp} + \rho^{i+1})/2$.
- VII. $\rho^{i+1} = \rho^{temp} / \alpha$. Rodar um FCOP para ρ^{i+1} . Se o ponto for factível, a solução será $\rho_{pmc} = (\rho^{temp} + \rho^{i+1})/2$ e fim. Se não, incrementar o contador $i = i + 1$ e ir para o passo III.

Para fins de ilustração, um exemplo passo a passo é mostrado a seguir usando o bem conhecido sistema teste do IEEE de 14 barras. Para isso, o carregamento inicial foi definido como $\rho = 10$ (ponto inicial infactível), conforme proposto em [4]. A margem de erro admissível $x\%$ neste caso foi ajustado para 5%, portanto, $\alpha = 1,1053$. O sistema foi dividido em sete áreas e o aumento de geração e carga ocorreu apenas em uma área em particular do sistema, contendo somente a barra 3, que apresenta a maior carga do sistema, igual a 94,5 MW e 19,0 MVar. A Figura 2.5 ilustra a evolução do processo iterativo.

Passo 1: $i = 0$, $\rho = 10$ e $x\% = 5$ ($\alpha = 1,1053$);

Passo 2: De acordo com o FCOP, ponto infactível. Vai para o Passo 3;

Passo 3: De [4], $\rho_{temp} = 7.027$. $\rho_{temp} > 1$. Vai para o passo 5;

Passo 5: De acordo com o FCOP este é um ponto infactível. Vai para o Passo 7;

Passo 7: $\rho^{(1)} = 6.3578$. De acordo com o FCOP, este é um ponto infactível. Vai para o Passo 3;

Passo 3: De [4], $\rho_{temp} = 2.6459$. $\rho_{temp} > 1$. Vai para o passo 5;

Passo 5: De acordo com o FCOP, este é um ponto infactível. Vai para o Passo 7;

Passo 7: $\rho^{(2)} = 2.3939$. De acordo com o FCOP, este é um ponto factível e a solução final é dado por $\rho_{pmc} = (\rho^{(i+1)} + \rho_{temp})/2$, portanto, $\rho_{pmc} = 2.5199$.

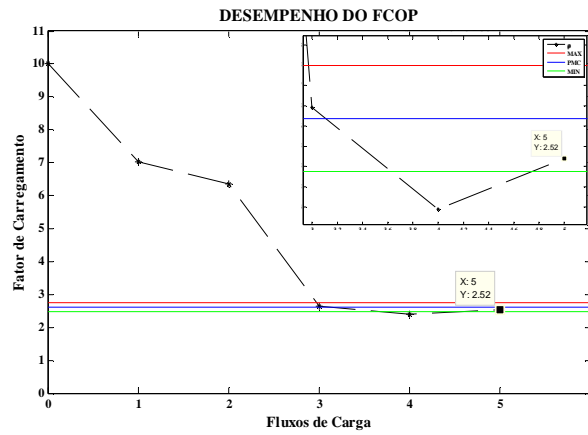


Figura 2.5 – Desempenho do método.

4.0 - RESULTADOS

A Figura 2.6 mostra de forma sucinta os resultados da utilização do método proposto para as diversas áreas do SIN. Os testes regionais realizados na rede do SIN consideraram somente aumento de geração e carga na região em análise, e o restante do sistema manteve-se no caso base (sem aumento de carga). Por isso algumas regiões apresentaram geração menor que as suas respectivas cargas, havendo nestes casos, a necessidade do sistema redespachar a potência necessária para as respectivas áreas com déficit. Os PMC's de todas as regiões foram obtidos sempre respeitando a margem de erro admissível ($x\%$) estipulada no início, levando para isso poucas iterações e poucos cálculos de fluxos de carga.

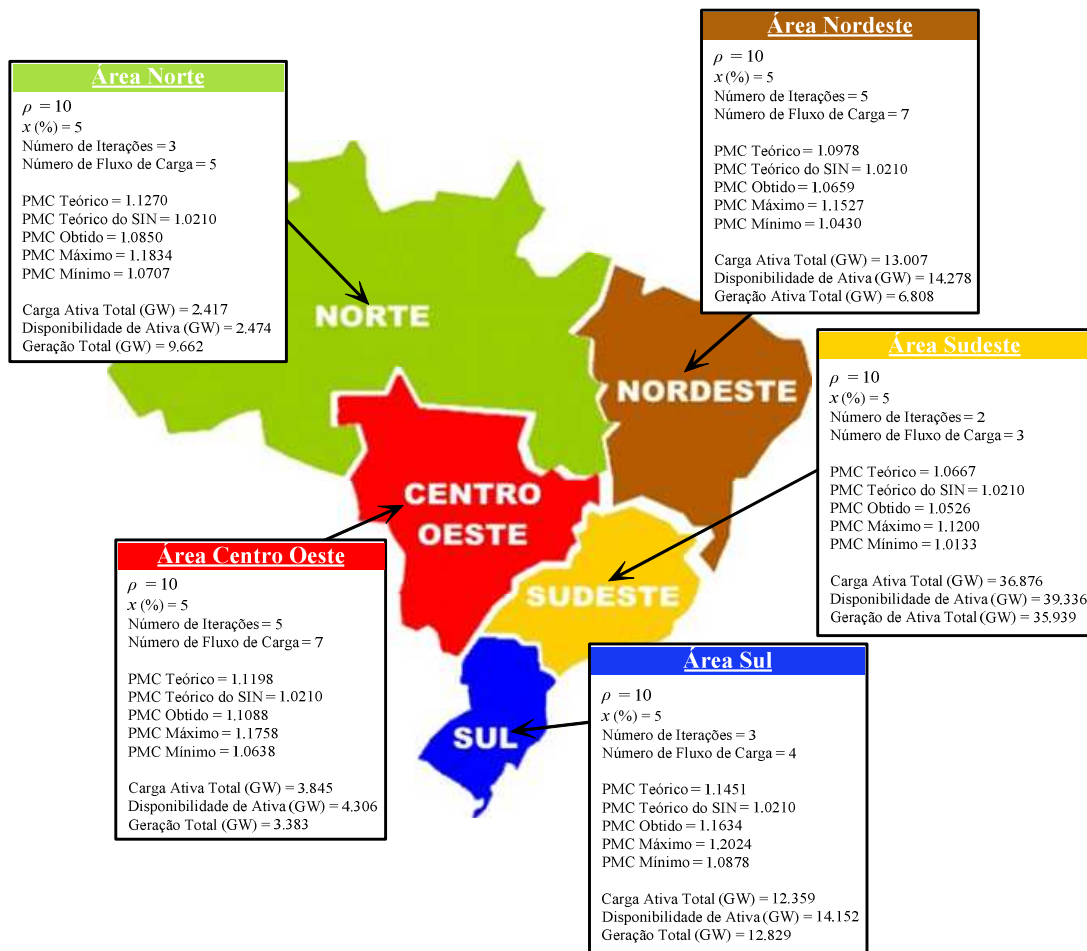


Figura 2.6 – Resultados para o SIN.

Tomemos, por exemplo, as informações referentes à região Sudeste. O quadro correspondente indica que o carregamento máximo da região é 1.0667, ou seja, há uma margem de 6,67% para aumento de carga. Este valor foi obtido através da utilização de métodos já bem conhecidos, como por exemplo o método da continuação. Naturalmente, esta margem é maior que o carregamento do SIN como um todo (aumento de carga em toda a rede), que é de 2,1%. Como foi estabelecido um erro aceitável de 5%, considera-se que o método proposto tem sucesso se o valor de máximo carregamento obtido estiver dentro da faixa [1,0133;1,1200]. De fato, o valor obtido pelo método proposto foi de 1.0526.

5.0 - CONCLUSÃO

Neste artigo foi proposto um método prático e eficiente para o cálculo da margem de carregamento de sistemas de potência com relação à estabilidade de tensão. O método baseia-se na utilização da técnica de fluxo de carga com otimização de passo, utiliza informações da geometria da fronteira de factibilidade e permite a definição de uma faixa de valores admissíveis para a margem de carregamento.

Considerando uma margem de erro admissível para o PMC de 5% para todas as regiões da rede, o método obteve o PMC de cada região sempre dentro da margem de trabalho definida, executando para isso poucas iterações e poucos fluxos de carga. Os testes regionais realizados na rede do SIN, com mais de 4500 barras, consideraram o aumento de geração e carga na região em análise, mantendo o restante do sistema como no caso base.

Uma vantagem importante do método proposto é que o operador, que inicialmente não conhece o PMC do sistema, facilmente pode obter soluções do PMC desde as primeiras execuções de fluxo de carga com carregamentos ineficazes, que configura uma situação muito favorável para sua implementação em tempo real. O método proposto mostra flexibilidade para qualquer carregamento inicial, característica dificilmente encontrada em programas comerciais, os quais usam métodos que podem apresentar problemas de convergência e dificuldades numéricas para sistemas ineficazes.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A.J. Monticelli, Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica, Edgard Blücher, 1983.
- [2] ONS, Submódulo 23.3: Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos, Disponível: <http://www.ons.org.br/ons/procedimentos/index.html>.
- [3] V. Ajjarapu, C. Christy, The continuation power flow: A tool for steady state voltage stability analysis, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol.7, n.1, pp.416-423, 1992.
- [4] M.F. Bedriñana, C.A. Castro, Maximum Loading Point Computation based on Load Flow with Step Size Optimization, in Proc. 2008 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Pittsburgh, PA, USA, 2008.
- [5] B.L. Tavares, M.F. Bedriñana, C.A. Castro, Practical Method for Computing the Maximum Loading Point Based on Load Flow with Step Size Optimization, *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol.5, n.2, pp.1250-1258, 2011.
- [6] S. Iwamoto, Y. Tamura, A load flow calculation method for ill-conditioned power systems, *IEEE Trans. Power App. and Syst.*, vol. PAS-100, pp.1736-1743, 1981.
- [7] C.A. Castro, L.M.C. Braz, A new approach to the polar Newton power flow using step optimization, in Proc. 29th North American Power Symp., Laramie, WY, USA, 1997.
- [8] I. Dobson, L. Lu, Observations on the geometry of saddle node bifurcation and voltage collapse in electrical power systems, *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Fundam. Theory Appl.*, vol.39, n.3, pp.240-243, 1992.