

3 Método Proposto Para Seleção e Ordenação de Contingências

O interesse é criar um método de seleção e ordenação de contingências que aproveite as características do método de avaliação das condições de segurança de tensão. Esse método é descrito nas próximas seções.

3.1 Índices para a avaliação nodal do carregamento da rede de transmissão [3]

3.1.1 Ferramenta Analítica

O objetivo é identificar se a solução de tensão para uma carga conectada à barra i está na parte superior, na inferior e a distância da “ponta do nariz” da curva $V \times P, Q$.

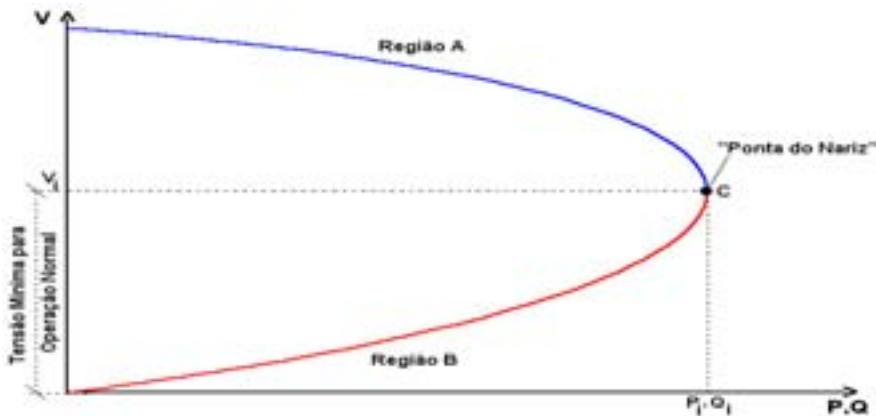


Figura 3.1 - Regiões de operação da curva $V \times P, Q$

Pela Figura 3.1 pode-se observar que a parte superior, região A, em azul, é a região normal de operação, enquanto a parte inferior, região B, em vermelho, é a região anormal de operação, onde ações de controle de tensão podem ter efeito contrário ao esperado se a carga se comportar como um modelo de potência constante. A “ponta do nariz”, indicada pelo ponto "C", corresponde à máxima potência ativa e reativa que pode ser transmitida para a carga (ou a partir de um gerador). A tensão na “ponta do nariz” é a magnitude mínima da tensão para a operação normal [9].

O sistema linearizado das equações estáticas do fluxo de carga é:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [J] \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (1)$$

Remanejando os termos para posicionar as equações relacionadas à barra em análise na parte inferior do sistema tem-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta P' \\ \Delta Q' \\ \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta' \\ \Delta V' \\ \Delta \theta_i \\ \Delta V_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

onde as sub-matrizes A, B, C e D são partições da matriz Jacobiano [J]. Assumindo uma variação incremental de carga (ou geração) ΔP e ΔQ somente na barra i, isto é, $\Delta P' = \Delta Q' = 0$, o sistema (2) é reduzido para um sistema de dimensão 2x2.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = [D'] \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta_i \\ \Delta V_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\text{onde } [D'] = [D] - [C] \cdot [A^{-1}] \cdot [B] \quad (4)$$

Portanto, as relações de sensibilidade entre as injeções de potência ativa e reativa e o módulo e ângulo da tensão na barra i , levando em consideração o restante do sistema podem ser avaliadas por (3) [10]. É demonstrado que o sinal e a magnitude do determinante da matriz $[D']$ indicam respectivamente a região de operação e a distância ao máximo (“ponta do nariz”).

3.1.1.1

Magnitude do determinante da matriz $[D']$

O fluxo de potência que chega a uma barra de carga i em um sistema de duas barras é igual à potência consumida pela carga. Considerando k como uma barra de geração o determinante da matriz $[D']$ é calculado por:

$$\det[D'] = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} \cdot \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} - \frac{\partial P_i}{\partial V_i} \cdot \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} \quad (5)$$

$$\text{onde } P_i = V_i^2 G_{ii} + V_i V_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) \quad (6)$$

$$Q_i = -V_i^2 B_{ii} + V_i V_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) \quad (7)$$

Resolvendo (5) com (6) e (7):

$$\det[D'] = -V_i V_k^2 (G_{ik}^2 + B_{ik}^2) + 2V_i^2 B_{ii} (V_k G_{ik} \sin \theta_{ik} - V_k B_{ik} \cos \theta_{ik}) - 2V_i^2 G_{ii} (V_k G_{ik} \cos \theta_{ik} + V_k B_{ik} \sin \theta_{ik}) \quad (8)$$

Fazendo $Y_{ik}^2 = (G_{ik}^2 + B_{ik}^2)$ e multiplicando ambos os lados de (8) por V_i :

$$\det[D'] * V_i = -[V_i V_k Y_{ik}]^2 + 2V_i^2 B_{ii} [V_i V_k (G_{ik} \sin\theta_{ik} - B_{ik} \cos\theta_{ik})] - 2V_i^2 G_{ii} [V_i V_k (G_{ik} \cos\theta_{ik} + B_{ik} \sin\theta_{ik})] \quad (9)$$

Por outro lado, a potência injetada na barra i pode ser escrita como

$$S_i = P_i + jQ_i.$$

De (6) e (7):

$$S_i^2 = P_i^2 + Q_i^2 = V_i^4 (G_{ii}^2 + B_{ii}^2) + V_i^2 \cdot V_k^2 \cdot Y_{ik}^2 + 2V_i^2 G_{ii} V_i V_k (G_{ik} \cos\theta_{ik} + B_{ik} \sin\theta_{ik}) - 2V_i^2 B_{ii} V_i V_k (G_{ik} \sin\theta_{ik} - B_{ik} \cos\theta_{ik}) \quad (10)$$

Fazendo $S_{io} = V_i^2 \cdot Y_{ii}$ e comparando (9) com (10), finalmente:

$$\det[D'] * V_i = S_{io}^2 - S_i^2 \quad (11)$$

Este é um importante resultado. O termo S_{io}^2 é função do elemento diagonal da matriz admitância de barra e do módulo da tensão na barra i . Supondo tensão constante, e incrementando a carga S_i , a máxima transmissão é encontrada quando S_i^2 é igual a S_{io}^2 e então $\det[D'] * V_i$ é igual a zero.

Para um sistema de duas barras pode ser declarado que:

- S_i é a potência injetada na barra i no ponto de operação sob análise.
- S_{io} é o máximo fluxo de potência que pode ser transmitido para a barra i dado por $S_{io} = V_i^2 \cdot Y_{ii}$.
- $\det[D'] \cdot V_i$ é um indicador da distância entre S_i^2 e S_{io}^2 .

O resultado pode ser estendido para um sistema multi-nó. Seja $[D]$ a matriz que relaciona linearmente as potências ativa e reativa com a magnitude e o ângulo da tensão na barra i .

$$[D] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_i}{\partial V_i} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & z \\ y & u \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\text{Seja : } -[C] \cdot [A^{-1}] \cdot [B] = \begin{bmatrix} b_1 & b_3 \\ b_2 & b_4 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Como em (4): $[D'] = [D] - [C] \cdot [A^{-1}] \cdot [B]$, e usando (12) e (13) pode-se escrever:

$$\det[D'] = \det \left[\begin{pmatrix} x & z \\ y & u \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 & b_3 \\ b_2 & b_4 \end{pmatrix} \right] \quad (14)$$

$$\text{Então, } \det[D'] = [x \cdot u - y \cdot z] + [x \cdot b_4 - y \cdot b_3] + [b_1 \cdot u - b_2 \cdot z] + [b_1 \cdot b_4 - b_2 \cdot b_3] \quad (15)$$

$$\text{Mas, } \det[D] = [x \cdot u - y \cdot z] \quad (16)$$

$$\text{E então: } \det[D'] = \det[D] + [x \cdot b_4 - y \cdot b_3] + [b_1 \cdot u - b_2 \cdot z] + [b_1 \cdot b_4 - b_2 \cdot b_3] \quad (17)$$

O resultado obtido em (11) para um sistema de duas barras onde $[D'] \equiv [D]$, é agora estendido. Multiplicando-se ambos os lados de (17) por V_i :

$$\det[D'] * V_i = \det[D] * V_i - S_{is}^2 \quad (18)$$

$$\text{onde: } S_{is}^2 = -V_i \{ [xb_4 - yb_3] + [b_1u - b_2z] + [b_1b_4 - b_2b_3] \} \quad (19)$$

$$\text{ou } \det[D'] * V_i = S_{io}^2 - S_i^2 - S_{is}^2 \quad (20)$$

A expressão (20) é a generalização de (11) para um sistema multi-nó. Comparando (11) com (18) o termo S_{is}^2 é:

$$S_{is}^2 = (\det[D] - \det[D']) * V_i \quad (21)$$

Para um sistema multi-nó pode ser declarado que:

- S_i é a potência injetada na barra i no ponto de operação sob análise.
- S_{io} é a máxima potência que pode ser injetada na barra i , para o caso de um sistema de duas barras (dada por $S_{io} = V_i^2 \cdot Y_{ii}$).
- S_{is} é a potência relacionada com todo o sistema e com os limites de injeção na barra i (dada por $S_{is}^2 = (\det[D] - \det[D']) * V_i$).
- $S_m = (S_{io}^2 - S_{is}^2)^{1/2}$ é a potência aparente que pode ser injetada na barra i .
- $\det[D'] * V_i$ é a distância entre S_i^2 e S_m^2 , c.q.d..

Então, $S_m - S_i$ é a margem entre a potência injetada e a máxima potência calculada para aquele ponto de operação.

3.1.1.2

Sinal do determinante da matriz $[D']$

Os vetores gradiente de potência ativa e reativa podem ser escritos como:

$$\dot{V}P = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} \cdot \vec{i} + \frac{\partial P_i}{\partial V_i} \cdot \vec{j} + 0 \cdot \vec{k} \quad \text{e} \quad \dot{V}Q = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} \cdot \vec{i} + \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} \cdot \vec{j} + 0 \cdot \vec{k} \quad (22)$$

onde \vec{i} , \vec{j} e \vec{k} são vetores de uma base ortonormal.

O produto vetorial é:

$$\dot{V}P \times \dot{V}Q = \left[\left(\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} \cdot \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} \right) - \left(\frac{\partial P_i}{\partial V_i} \cdot \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} \right) \right] \cdot \vec{k} \quad (23)$$

$$\text{e então } \dot{V}P \times \dot{V}Q = \det[D'] \quad (24)$$

$$\text{Como } \dot{V}P \times \dot{V}Q = |\dot{V}P| \cdot |\dot{V}Q| \cdot \text{sen}(\beta) \quad (25)$$

$$\text{Então: } \det[D'] = |\dot{V}P| \cdot |\dot{V}Q| \cdot \text{sen}(\beta) \quad (26)$$

onde β é o ângulo entre $\dot{V}P$ e $\dot{V}Q$.

Como o sinal do $\det[D']$ é função somente de β , então:

$$\det[D'] > 0 \text{ se } \sin(\beta) > 0, \text{ i.e. } 0^\circ < \beta < 180^\circ$$

$$\det[D'] < 0 \text{ se } \sin(\beta) < 0, \text{ i.e. } 0^\circ > \beta > -180^\circ$$

$$\det[D'] = 0 \text{ se } \sin(\beta) = 0, \text{ i.e. } \beta = \pm 180^\circ$$

Tomando $\hat{\nabla}P_i$ como referência dos eixos na Figura 3.2, pode ser observado que $0^\circ < \beta < 180^\circ$ na região normal de operação e que $0^\circ > \beta > -180^\circ$ na região anormal de operação.

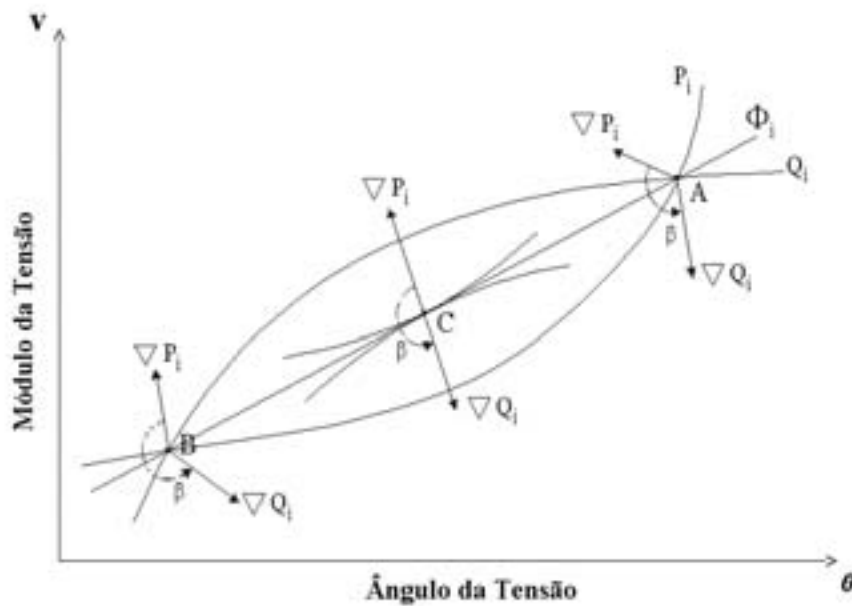


Figura 3.2 – Localização do vetor gradiente de P_i e Q_i no plano $V \times \theta$

No máximo, os vetores gradiente $\dot{V}P_i$ e $\dot{V}Q_i$ estão alinhados e o ângulo β é $\pm 180^\circ$. Conseqüentemente, $\det[D'] > 0$ indica a metade superior da curva $V \times P$, Q e $\det[D'] < 0$ indica a metade inferior. Obviamente, $\det[D'] = 0$ indica a “ponta do nariz”, c. q. d. É fácil inferir que β é também um indicador da região de operação e da distância (angular) ao máximo. A Figura 3.3 mostra projeções das curvas P_i constante, Q_i constante e ϕ_i constante nos planos $V \times P, Q$ e $V \times \theta$.

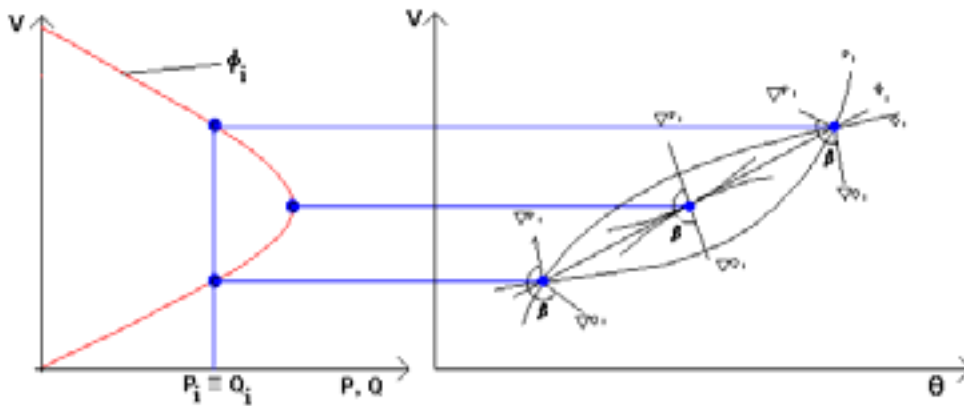


Figura 3.3 - Projeções das curvas P_i constante, Q_i constante e ϕ_i constante nos planos $V \times P, Q$ e $V \times \theta$.

3.1.1.3

Interpretação dos índices

O valor $(S_m - S_i)$ é a margem entre a potência injetada e o máximo calculado para o ponto de operação em análise. O sinal do ângulo β é um indicador da região de operação.

Todos os valores calculados são válidos apenas instantaneamente porque são calculados para um ponto de operação específico. Eles podem perder o significado no minuto seguinte porque cargas e gerações se alteraram, compensação reativa ou taps de LTCs atingiram seus limites, o comportamento do sistema é não-linear etc. Portanto, as análises são executadas com cautela, especialmente em relação às margens. Não há índices baseados em ponto de operação capazes de predição.

O grupo de índices proposto resolveu dois problemas clássicos. O primeiro é a interpretação do tamanho do índice: $S_m = 100$ é grande ou pequeno? É grande para uma barra e pequeno para outra? Analisando S_i resolve-se a questão. Por exemplo, $S_m = 10$ e $S_i = 1$, então a margem é 9 vezes a injeção. Se $S_i = 99$ e $S_m = 100$, então a margem é por volta de 0,01 da quantidade injectada.

O segundo problema é a importância relativa entre duas barras, por exemplo, para a localização de ações de controle operacionais ou a instalação de novas fontes de compensação. A questão é resolvida por $S_m - S_i$ (quanto menor, pior é a situação) dividido por S_m (quanto maior, mais importante é a barra). A margem em p.u. de S_m pode ser definida, para cada barra i :

$$M = \left(1 - \frac{S_i}{S_m} \right)$$

A barra crítica é aquela com a menor margem M . Portanto, é justo classificar as barras de acordo com o seu grau de carregamento.

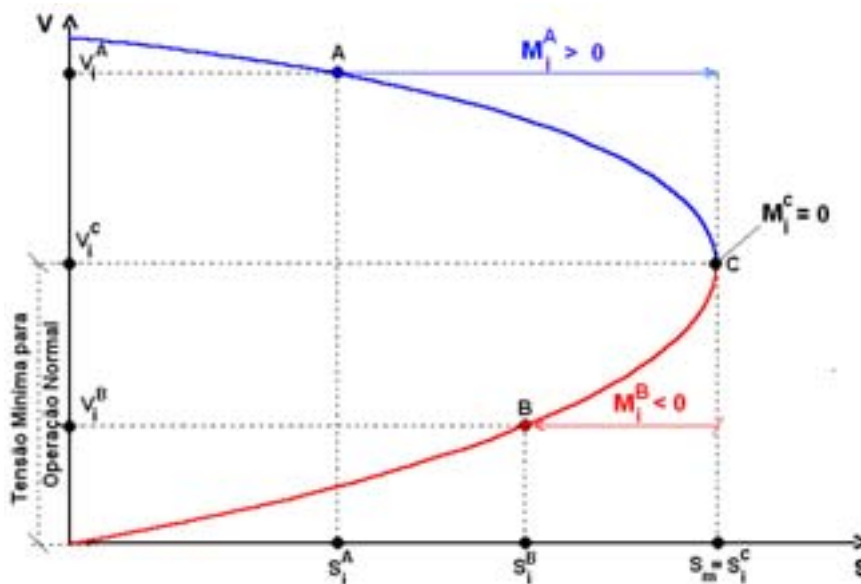


Figura 3.4 - Localização de pontos de operação na curva $V \times P, Q$ e suas respectivas margens.

Pela Figura 3.4 pode-se observar a interpretação das margens de acordo com a localização do ponto de operação na curva $V \times P, Q$. Observa-se que o ponto A

encontra-se na região normal de operação e portanto sua margem M_i^A é positiva. O ponto B está localizado na região anormal de operação e sua margem M_i^B é negativa. Já o ponto C encontra-se na “ponta do nariz” da curva $V \times P, Q$ e neste caso a margem é nula. O método de avaliação não traça a curva da Figura 3.4, e sim uma avaliação do ponto C para a mesma tensão do ponto de operação em análise.

Na Figura 3.4(a), pode-se observar o ponto de operação A, definido por V_i^A , S_i^A , β_i^A e $S_{m_i}^A$.

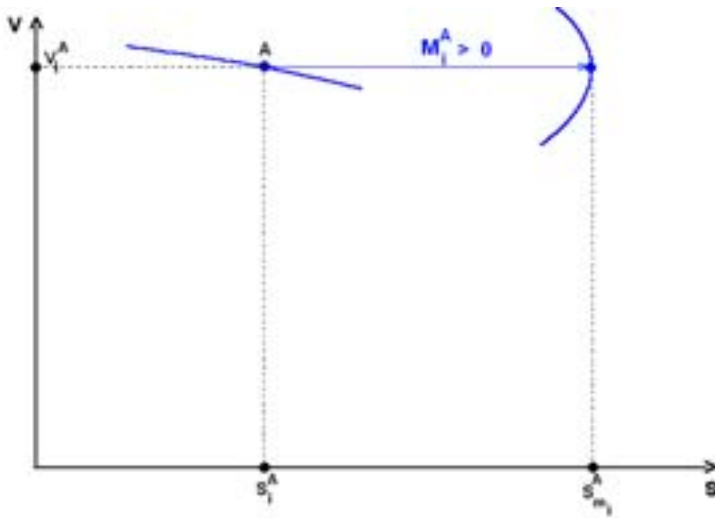


Figura 3.4(a) - Ponto de operação localizado na parte superior da curva $V \times P, Q$

O sinal de β_i^A é positivo, portanto o ponto A está na parte superior da curva, logo M_i^A é positiva. Como $M_i^A = 1 - \frac{S_i^A}{S_{m_i}^A}$, então $1 - \frac{S_i^A}{S_{m_i}^A} > 0$ e $S_{m_i}^A > S_i^A$, ou seja, a máxima potência calculada para o ponto de operação em análise é maior que a potência injetada na barra i .

Na Figura 3.4(b), pode-se observar o ponto de operação B, definido por V_i^B , S_i^B , β_i^B e $S_{m_i}^B$.

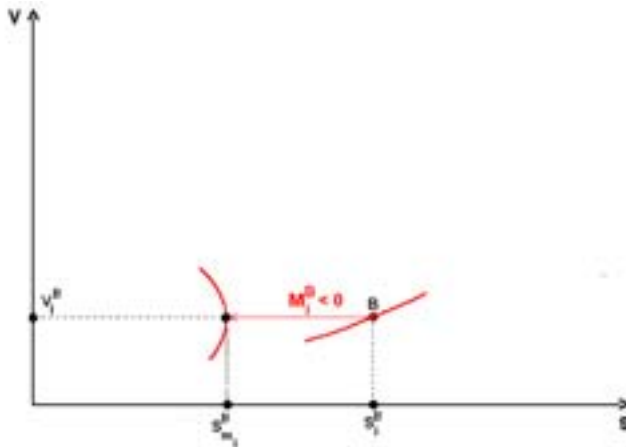


Figura 3.4(b) - Ponto de operação localizado na parte inferior da curva V x P, Q.

O sinal de β_i^B é negativo, portanto o ponto B está na parte inferior da curva, logo M_i^B é negativa. Como $M_i^B = 1 - \frac{S_i^B}{S_{m_i}^B}$, então $1 - \frac{S_i^B}{S_{m_i}^B} < 0$ e $S_{m_i}^B < S_i^B$, ou seja, a máxima potência calculada para o ponto de operação em análise é menor que a potência injetada na barra i.

Na Figura 3.4(c), pode-se observar o ponto de operação C, definido por V_i^C , S_i^C , β_i^C e $S_{m_i}^C$.

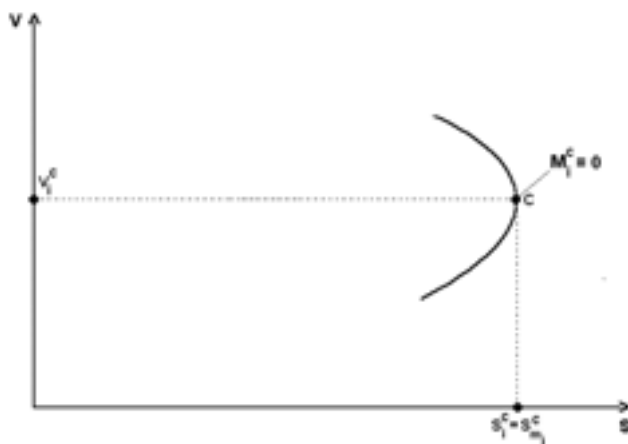


Figura 3.4(c) - Ponto de operação localizado na "ponta do nariz" da curva V x P, Q.

O ângulo $\beta_i^C = \pm 180^\circ$ e portanto o sinal de β_i^C é nulo. Logo conclui-se que o ponto C está na “ponta do nariz” onde M_i^C é nulo. Como $M_i^C = 1 - \frac{S_i^C}{S_{m_i}^C}$, então $1 - \frac{S_i^C}{S_{m_i}^C} = 0$ e $S_{m_i}^C = S_i^C$, ou seja, a máxima potência calculada para o ponto de operação em análise é igual a potência injetada na barra i.

Um índice de sensibilidade pode também ser definido para cada barra i para traduzir os efeitos na margem de uma ação de controle ou de um acréscimo de carga.

$$SI = (\text{sinal de } \beta_0) \cdot \left(\frac{M_1}{M_0} - 1 \right)$$

onde M_0 é a margem original e M_1 é a margem após a ação de controle ou o acréscimo de carga. Se SI é positivo, a ação de controle foi benéfica para a margem. Se SI é negativo, a ação de controle foi prejudicial à margem. Portanto, o efeito das ações de reforço é facilmente avaliado: basta comparar a margem para os dois diferentes pontos de operação.

O ângulo β traduz uma medida de dificuldade de transmissão. O máximo está próximo quando β se aproxima de 180° mesmo se a injeção é pequena e a margem é grande. Neste caso um pequeno acréscimo em S_i pode causar uma substancial redução da margem.

O modelo linearizado do sistema (1) inclui mecanismos de controle de tensão locais e remotos tais como LTCs e fontes variáveis de potência reativa. Sua inclusão afeta os índices S_m e β . Os limites de produção/absorção de potência reativa por geradores depende da tensão terminal e da potência ativa gerada. Quando um limite é alcançado, uma tensão constante atrás de uma reatância síncrona modela o gerador. A localização e o número de barras responsáveis para suprir o aumento de geração para equilibrar o aumento de carga na barra i e a

variação das perdas também afetam os índices S_m e β e portanto, são modelados em (1).

O valor dos índices S_m e β “saltam” quando o controle de tensão em uma barra próxima é perdido. Não existe índice capaz de predizê-lo. De qualquer forma, como os índices nodais S_m e β foram criados para operação em tempo real, e a ferramenta de avaliação de segurança de tensão deve ser executada a cada 10 minutos, então a trajetória dos índices é traçada. Todos eventos que talvez conduzam ao “salto dos índices”, são considerados como contingências. Estes eventos incluem esgotamento da produção de potência reativa, alcance do limite dos taps de LTCs, desconexão de geradores e SVCs.

3.1.2

Análise de contingências

O esquema para evitar o cálculo da matriz $[D']$ para todas as barras do sistema e para todas as contingências é muito simples embora eficiente: calcular $\det[D']$ nas barras diretamente associadas com a contingência e nas camadas de barras ao redor do distúrbio até que os valores pós-contingência tornem-se iguais aos valores pré-contingência. As tolerâncias são compatíveis com aquelas utilizadas no cálculo do fluxo de potência [10].

3.2 Seleção e ordenação de contingências – Método proposto

3.2.1 Introdução

A ferramenta analítica, descrita em detalhes na seção 3.1, permite avaliar as condições nodais através de um modelo matemático simples e ao mesmo tempo poderoso. Os índices resultantes desse método permitem analisar de forma abrangente e significativa as condições do sistema, indicando de forma segura a região de operação na curva $V \times P, Q$, a margem em MVA para o máximo carregamento e a importância relativa entre barras.

O programa ESTABTEN utiliza essa ferramenta para avaliação do carregamento da rede de transmissão e da eficácia do controle de tensão, e para tanto, gera e fornece todos os índices que o método ora proposto necessita para a seleção e ordenação de contingências, como será visto a seguir.

Baseado nesses índices, o método proposto permite de forma simples e rápida, compatível com tempos de processamento em tempo real, avaliar, selecionar e ordenar as contingências de uma grande lista, reduzindo-a a um número de contingências realmente perigosas para a segurança de tensão do sistema. Desta forma, poder-se-á definir de forma eficaz e rápida as devidas ações de controle de tensão e a avaliação do carregamento para cada uma das contingências contidas na lista.

3.2.2

Cálculo das margens do caso base e dos casos contingências

Para um sistema multi-nó, em um determinado ponto de operação, são fornecidos pelo programa ESTABTEN os índices necessários ao cálculo das margens para um caso base, conforme a seguir:

1. S_i^0 : potência injetada na barra i , para o caso base
2. $S_{m_i}^0$: máxima potência aparente que poderia ser injetada na barra i , para o caso base

3. β_i^0 : ângulo entre ∇P_i^0 e ∇Q_i^0 , na barra i , para o caso base

Esses índices já foram explicitados detalhadamente na Seção 3.1.

A margem de potência da barra i , para o caso base, pode ser calculada como:

$$M_i^0 = S_{m_i}^0 - S_i^0$$

Observa-se que para o caso base haverá um número i de margens, referentes às barras do sistema em análise.

Aplicando-se ao sistema em estudo as contingências a serem analisadas, obtém-se os seguintes índices fornecidos pelo programa ESTABTEN:

1. S_i^j : potência injetada na barra i , para o caso contingência $\#j$
2. $S_{m_i}^j$: máxima potência aparente que poderia ser injetada na barra i , para a contingência $\#j$
3. β_i^j : ângulo entre ∇P_i^j e ∇Q_i^j , na barra i , para o caso contingência $\#j$

A margem de potência da barra i , para contingência $\#j$, pode ser calculada como:

$$M_i^j = S_{m_i}^j - S_i^j$$

Observa-se que para cada caso contingência haverá um número i de margens, referentes às barras do sistema em análise.

3.2.3

Seleção e ordenação de contingências através de avaliação nodal

De posse de todas as margens do sistema, tanto do caso base, quanto das demais contingências sob análise, passa-se ao critério que será adotado para selecionar e ordenar as contingências. Esse critério é baseado na redução das

margens de potência aparente, conforme será visto a seguir, considerando que não houve violação de nenhum dos critérios de segurança de tensão.

3.2.3.1

Ordenação de contingências utilizando o Índice de Sensitividade

Considera-se uma contingência, quando na ocorrência de um evento verifica-se a redução da margem da potência que pode ser injetada em uma barra do sistema.

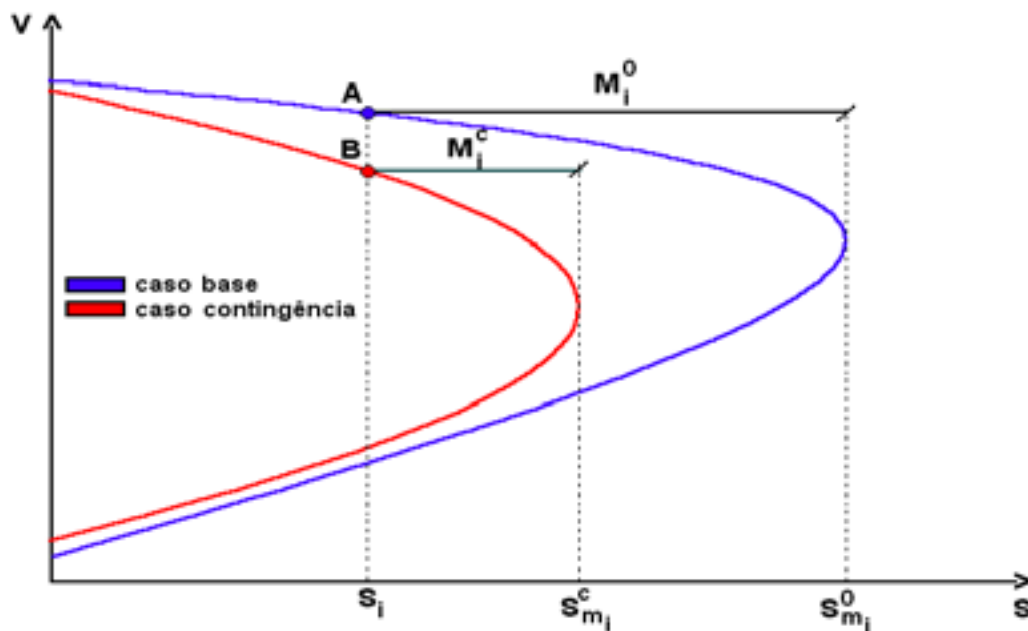


Figura 3.5 - Curva V x P, Q do caso base e do caso contingência com suas respectivas margens de potência

Pela Figura 3.5 pode-se observar que a contingência causou uma redução na margem de potência em relação ao caso base :

$$M_i^0 > M_i^C$$

onde:

M_i^0 : Margem de potência que pode ser injetada na barra i, no caso base;

M_i^C : Margem de potência que pode ser injetada na barra i no caso contingência.

Esta redução pode ser quantificada pela expressão do Índice de Sensitividade, abordado na Seção 3.1.1.3, o qual permite verificar os efeitos na margem após um evento que cause mudança na situação do ponto de operação.

$$IS = (\text{Sinal de } \beta_0) \times \left(\frac{M_1}{M_0} - 1 \right)$$

onde M_0 é a margem original e M_1 é a margem após a ação de controle ou o acréscimo de carga. O ângulo β_0 traduz a medida da dificuldade de transmissão.

Esse índice quando utilizado para medir o resultado de ações de controle, apresenta valores positivos. Quanto maior o índice de sensibilidade, mais eficaz a ação de controle, ou seja, significa que a ação tomada resultou em melhora da margem de potência daquela barra em relação ao caso base. Logo, para ações de controle eficazes esse índice deve apresentar valores positivos e, de forma análoga, para contingências, esse índice deve apresentar valores negativos.

Observando-se a Figura 3.5, o Índice de Sensitividade da contingência #c em relação ao caso base para a barra i seria:

$$IS_i^c = (\text{Sinal de } \beta_i^0) \times \left(\frac{M_i^c}{M_i^0} - 1 \right)$$

onde:

IS_i^c : Índice de Sensitividade da barra i, para contingência #c, em relação ao caso base;

β_i^0 : Ângulo entre ∇P_i^0 e ∇Q_i^0 , na barra i, para o caso base;

Sinal de β_i^0 : Indicador da região do ponto de operação no caso base;

M_i^0 : Margem de potência que pode ser injetada na barra i, no caso base;

M_i^c : Margem de potência que pode ser injetada na barra i, no caso contingência #c.

Observa-se que $M_i^C < M_i^0$ e o sinal de $\beta_i^0 > 0$, pois o ponto de operação no caso base está na parte superior da curva. Logo o IS_i^C será negativo, o que significa que a contingência causou uma redução na margem de potência de IS_i^C . Logo, para contingências esse índice normalmente deve apresentar valores negativos. Portanto, para utilizar esse índice na medição do grau de severidade da contingência, deve-se observar que quanto mais severa for a contingência, maior será a redução da margem de potência da barra analisada em relação a margem anterior verificada na pré-contingência. Como trata-se de redução, esses índices serão negativos e quanto mais negativo, maior a redução da margem e consequentemente mais contundente será a contingência para a barra em estudo. Desta forma, uma contingência #k é considerada mais severa do que outra contingência #q se $IS_i^k < IS_i^q$. Como os Índices de Sensitividade são negativos quando referem-se a contingências, pode-se afirmar que uma contingência é tão severa quanto mais negativo for o índice de sensibilidade. Isso pode ser verificado pela Figura 3.6.

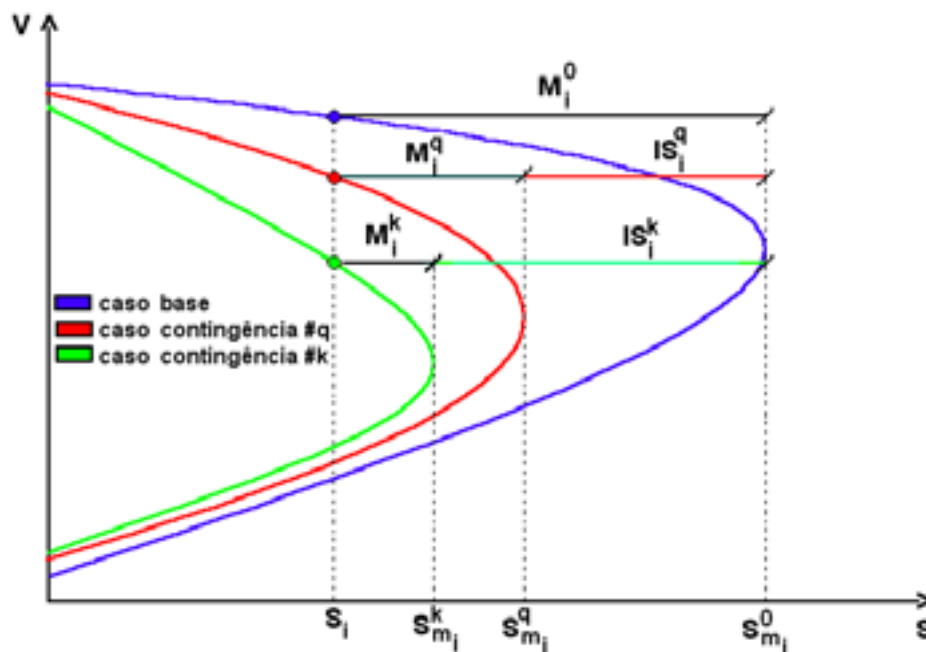


Figura 3.6 - Curvas do caso base e contingências com suas respectivas margens de potência e Índices de Sensitividade

Pela Figura 3.6, pode-se observar que a contingência #k é mais severa que a contingência #q, já que IS_i^k é mais negativo que IS_i^q .

3.2.3.2

Seleção de contingências utilizando o Índice de Sensitividade (IS_i^j)

A partir de um limite, ou seja, um índice crítico, IS_i^C , pode-se selecionar determinadas contingências, segundo critérios preestabelecidos pelo usuário na escolha desse índice crítico. As contingências selecionadas serão então consideradas críticas quando apresentarem $IS_i^j < IS_i^C$, isto é, quando a contingência causar uma redução da margem do caso base superior a redução permitida IS_i^C . A Figura 3.7 ilustra esse processo de seleção.

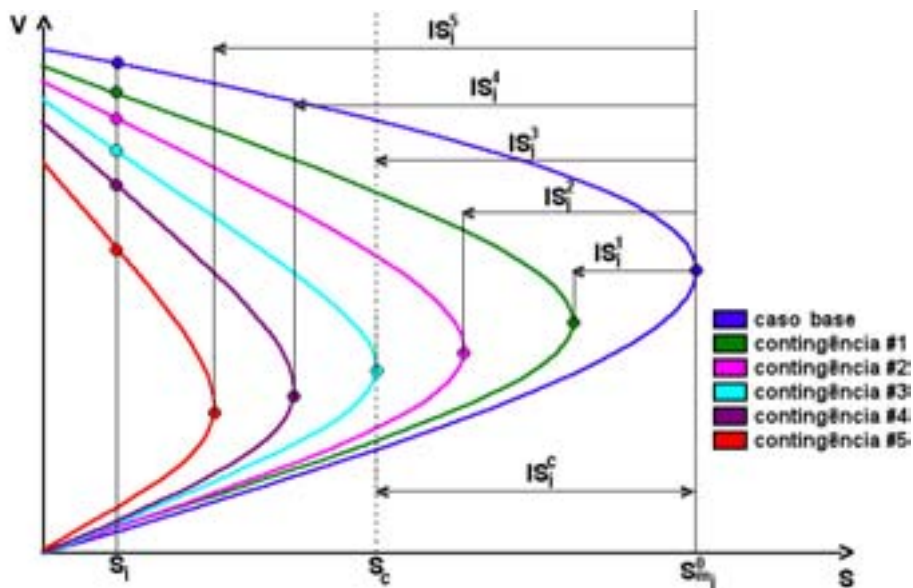


Figura 3.7 - Caso base e contingências selecionadas pelo Índice de Sensitividade Crítico

Na Figura 3.7 são aplicadas várias contingências ao caso base. Para cada contingência existe um índice IS_i^j . A linha pontilhada indica a máxima redução da margem de potência permitida para a barra i . Esse limite é determinado pelo IS_i^C . As contingências #1, #2 e #3 não são consideradas críticas, já que suas reduções estão dentro do limite preestabelecido, ou seja, $IS_i^1 > IS_i^2 > IS_i^C$ e $IS_i^3 = IS_i^C$. Porém as contingências #4 e #5 são críticas pois suas reduções foram maiores que o limite preestabelecido, ou seja, $IS_i^5 < IS_i^4 < IS_i^C$. Conclui-se, que a contingência #5 é mais severa que a contingência #4, já que $IS_i^5 < IS_i^4$. Como quanto mais

negativo é o índice IS_i^j , mais severa é a contingência (maior a redução), pode-se afirmar que a contingência #5 é a mais severa e a menos severa é a contingência #1.

Esse método de seleção e ordenação de contingências é realizado para cada barra e, portanto, haverá uma seleção e uma ordenação de contingências diferentes para cada barra. Caberá ao usuário definir, de acordo com a importância das barras, as ações de controle pertinentes.

3.2.3.3

Ordem de grandeza do Índice de Sensibilidade (IS_i^j) para sinal $\beta_i^0 > 0$

Pela Figura 3.8(a), observa-se que quando o valor de $S_{m_i}^j$ é aproximadamente igual a $S_{m_i}^0$, o valor do Índice de Sensibilidade da contingência em análise (IS_i^j) tende a 0. Isso ocorre porque as margens são aproximadamente iguais, refletindo a pequena influência da contingência sobre a barra em estudo.

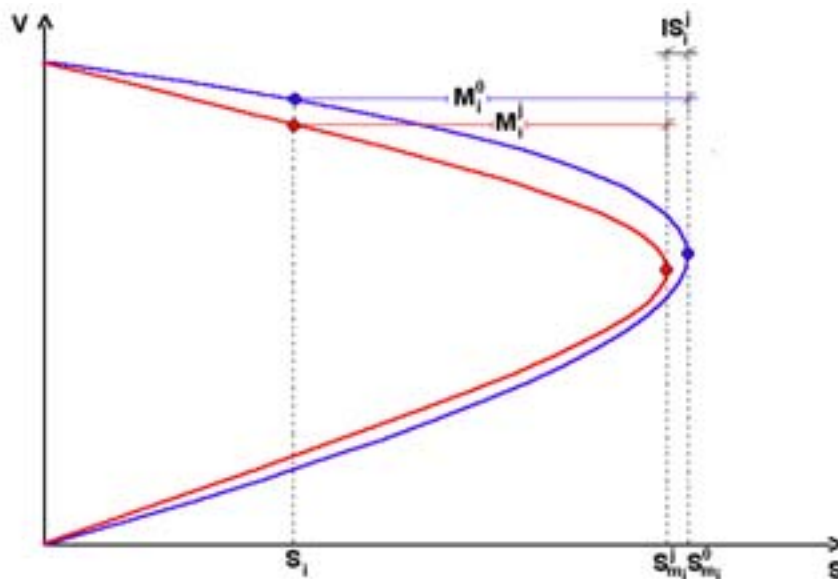


Figura 3.8(a) - Ponto de operação localizado na região normal das curvas V x P, Q do caso base e caso contingência, com $S_{m_i}^j \cong S_{m_i}^0$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Sinal de } \beta_i^0 > 0 \\ M_i^0 > 0 \\ M_i^j > 0 \\ M_i^0 > M_i^j \\ M_i^0 \cong M_i^j \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Como: } IS_i^j = (\text{Sinal de } \beta_i^0) \times \left(\frac{M_i^j}{M_i^0} - 1 \right) \\ \\ \text{Logo: } \begin{cases} IS_i^j < 0 \\ \text{e} \\ IS_i^j \cong 0 \end{cases} \end{array}$$

Conforme pode ser observado pela Figura 3.8(b), a contingência causa uma redução mais acentuada da margem, transferindo o ponto de operação para próximo da “ponta do nariz” no caso contingência, o que significa que a barra perdeu a margem de transferência de potência, ou seja, está operando com um carregamento igual ou próximo de sua capacidade máxima. Nesse caso o valor da margem M_i^j é muito pequeno, levando o valor de IS_i^j a tender a -1.

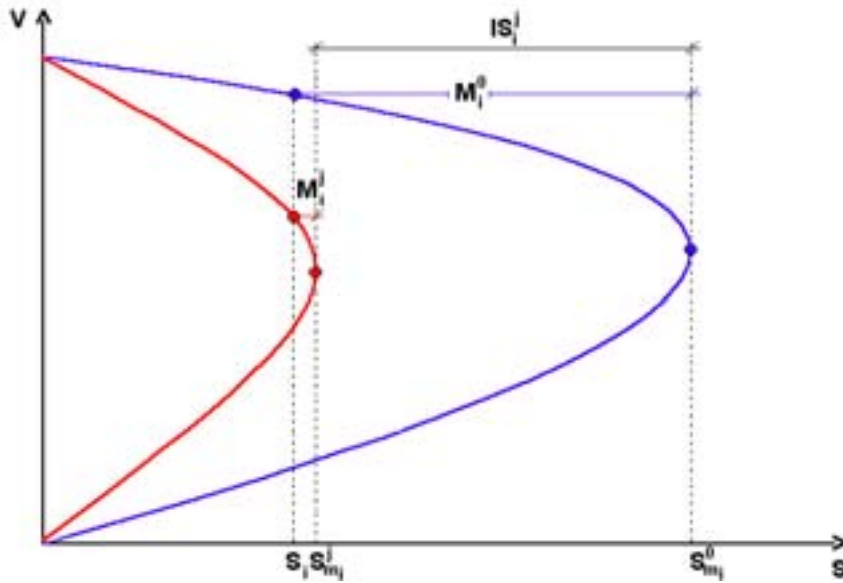


Figura 3.8(b) - Ponto de operação localizado na região normal das curvas $V \times P, Q$ do caso base e do caso contingência, com $S_{m_i}^j \cong S_i^0$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Sinal de } \beta_i^0 > 0 \\ M_i^0 > 0 \\ M_i^j > 0 \\ M_i^j \cong 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{como: } IS_i^j = (\text{Sinal de } \beta_i^0) \times \left(\frac{M_i^j}{M_i^0} - 1 \right) \\ \\ \text{logo: } \begin{cases} IS_i^j < 0 \\ \text{e} \\ IS_i^j \cong -1 \end{cases} \end{array}$$

Já na Figura 3.8(c), observa-se que a contingência levou o ponto de operação para a região anormal, onde toda a margem de potência é negativa.

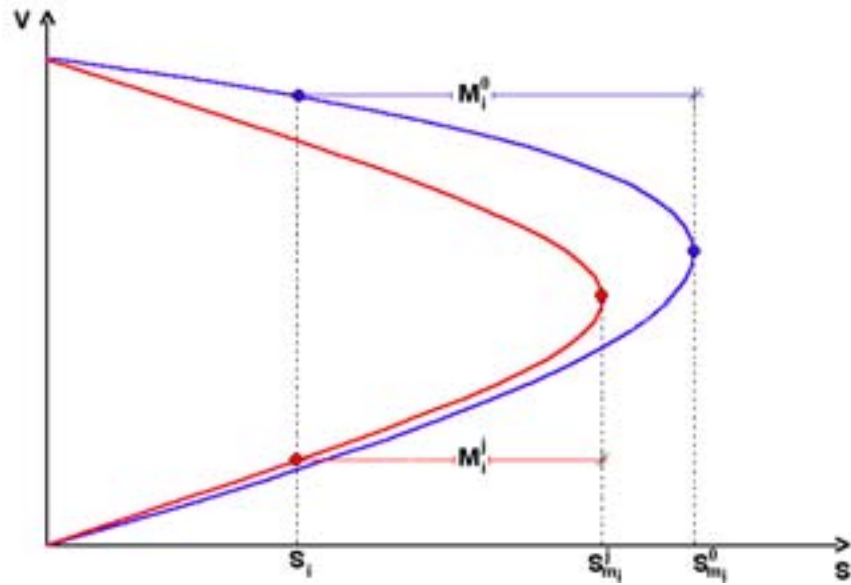


Figura 3.8(c) - Ponto de operação localizado na região normal da curva V x P, Q do caso base e na região anormal do caso contingência.

Como M_i^0 é positiva e M_i^j é negativa, a razão entre as duas margens será negativa resultando em valores de IS_i^j menores que -1:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Sinal de } \beta_i^0 > 0 \\ M_i^0 > 0 \\ M_i^j < 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{como:} \\ \text{logo:} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} IS_i^j = (\text{Sinal de } \beta_i^0) \times \left(\frac{M_i^j}{M_i^0} - 1 \right) \\ IS_i^j < 0 \\ \text{e} \\ IS_i^j < -1 \end{array} \right.$$

Dessa forma, conclui-se que quando sinal de $\beta_i^0 > 0$, de acordo com a severidade da contingência, o valor de IS_i^j pode variar de ∞ a -1 e de valores menores que -1, quando:

- $IS_i^j > 0$: Houve uma melhoria na margem de potência
- $IS_i^j = 0$: A contingência não teve influência na barra em análise
- $-1 < IS_i^j < 0$: IS_i^j pode variar de aproximadamente 0 até aproximadamente -1, indicando que houve redução da margem de potência da barra em análise. Logo uma contingência poderá influenciar mais quanto mais negativo for o Índice de Sensitividade, até o mínimo de -1, ou não influenciar muito, ou nada o sistema, e nesse caso $IS_i^j \cong 0$. De qualquer forma, nesse intervalo de IS_i^j , o ponto de operação no caso contingência encontra-se na região normal de operação, ou seja na parte superior da curva $V \times P, Q$.
- $IS_i^j = -1$: A contingência foi de tal forma prejudicial, que reduziu a margem de potência da barra a zero, ou seja, o ponto de operação no caso contingência fica localizado na “ponta do nariz” da curva $V \times P, Q$, onde $M_i^j = 0$
- $IS_i^j < -1$: A contingência foi de tal forma prejudicial, que levou o ponto de operação para a região anormal, ou seja, para a parte inferior da curva $V \times P, Q$, onde as margens são negativas e onde ações de controle de tensão podem ter efeito contrário ao esperado.

A Figura 3.9, mostra de uma forma geral os casos estudados nessa seção.

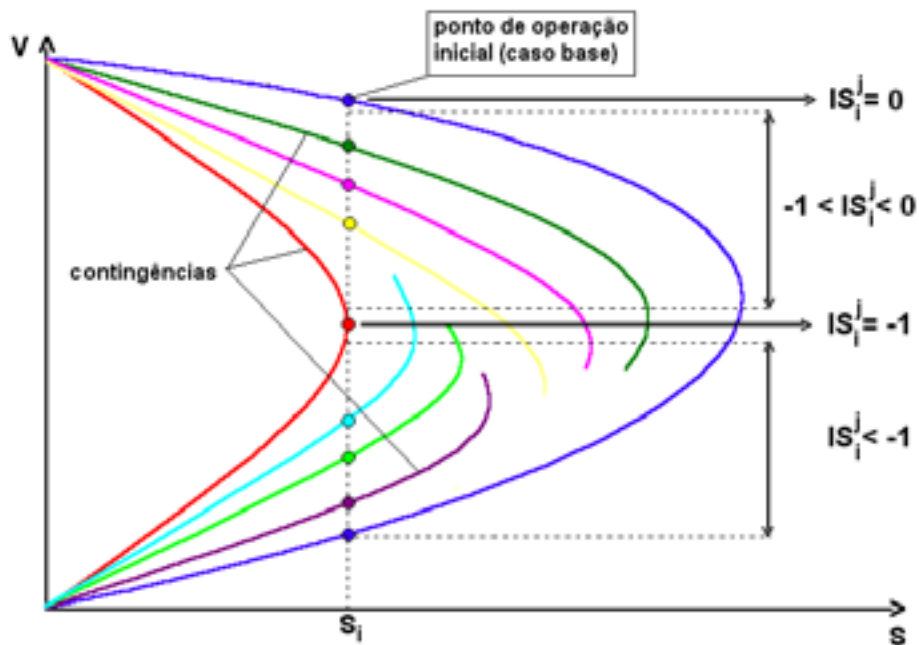


Figura 3.9 - Caso base e contingências com seu respectivos limites de Índice de Sensitividade

Analisando a Figura 3.9, pode-se observar que:

- Quando $IS_1^j = 0$, a curva V x P, Q do caso contingência praticamente sobrepõe-se a curva do caso base, o que significa que não houve alteração da margem de potência.
- Quando $-1 < IS_1^j < 0$, a contingência causa redução na margem de potência, porém a margem continua positiva, com o ponto de operação na parte superior da curva. Esse intervalo denota a severidade com que a contingência pode atuar sobre o sistema, porém mantendo o ponto de operação na região normal.
- Quando $IS_1^j = -1$ a contingência atua de tal forma sobre o sistema, extinguindo por completo a margem de transferência de potência, denotando o limite crítico de operação, ou seja, a “ponta do nariz” da curva V x P, Q.

- Quando $IS_i^j < -1$ o ponto de operação passa para a parte inferior da curva, denotando a severidade da contingência a proporção que assume valores cada vez mais inferiores a -1.

Esta análise levou em consideração que o ponto de operação no caso base (pré-contingência) localizava-se na parte superior da curva $V \times P, Q$, ou seja, com Sinal de $\beta_i^0 > 0$. Na Seção seguinte serão analisados os casos com sinal de $\beta_i^0 < 0$

3.2.3.4

Ordem de grandeza do Índice de Sensitividade (IS_i^j) para sinal $\beta_i^0 < 0$

Na Seção 3.2.3.3, foi visto a variação do IS_i^j quando o ponto de operação sob análise encontrava-se na parte superior da curva.

Nesta seção, de forma análoga, será verificada a ordem de grandeza do IS_i^j quando o ponto de operação encontrar-se na parte inferior da curva.

Se tal situação ocorrer, parece lógico que ações de controle venham a ser tomadas com o intuito de mudar o ponto de operação para uma situação mais favorável, ao invés de selecionar e ordenar contingências. O sistema já está numa situação de risco e o mais apropriado, portanto, seria indicar ações de controle de tensão.

Todavia, situações onde o ponto de operação no caso base localiza-se na parte inferior da curva $V \times P, Q$ (região anormal) costuma ser normal em alguns casos do Sistema Interligado Nacional.

Assim sendo, pela Figura 3.10(a) pode-se observar que houve uma redução da margem de potência entre o caso base e o caso contingência.

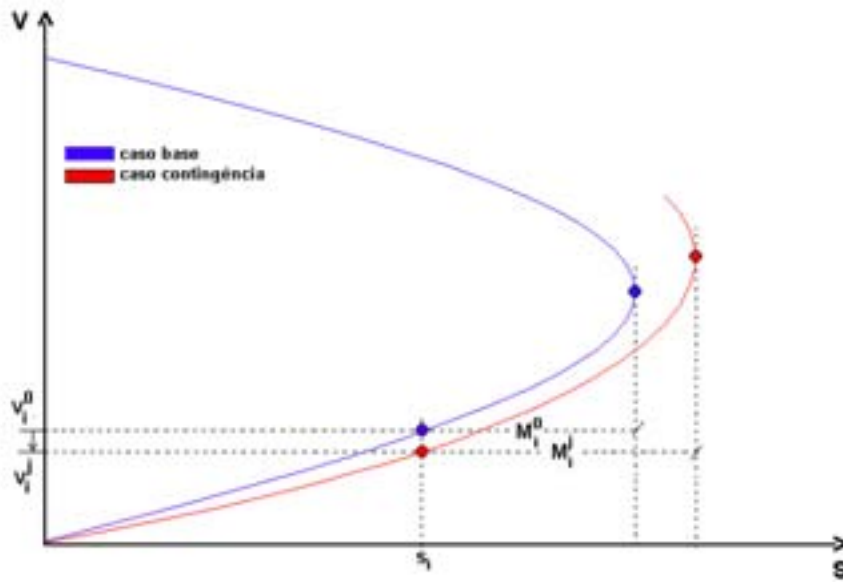


Figura 3.10(a) - Ponto de operação localizado na região anormal da curva V x P, Q do caso base e na região anormal do caso contingência com queda de tensão final.

$$\left. \begin{array}{l} \text{Sinal de } \beta_i^0 < 0 \\ M_i^0 < 0 \\ M_i^j < 0 \\ |M_i^0| < |M_i^j| \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{como: } IS_i^j = (\text{Sinal de } \beta_i^0) \times \left(\frac{M_i^j}{M_i^0} - 1 \right) \\ \text{logo: } IS_i^j < 0 \end{array}$$

O IS_i^j apresenta valores negativos quando o ponto de operação no caso contingência permanece ainda na região anormal de operação e apresenta queda de tensão em relação ao ponto de operação do caso base.

Pela Figura 3.10(b), pode-se observar que houve uma melhora na margem de potência entre o caso base e o caso contingência.

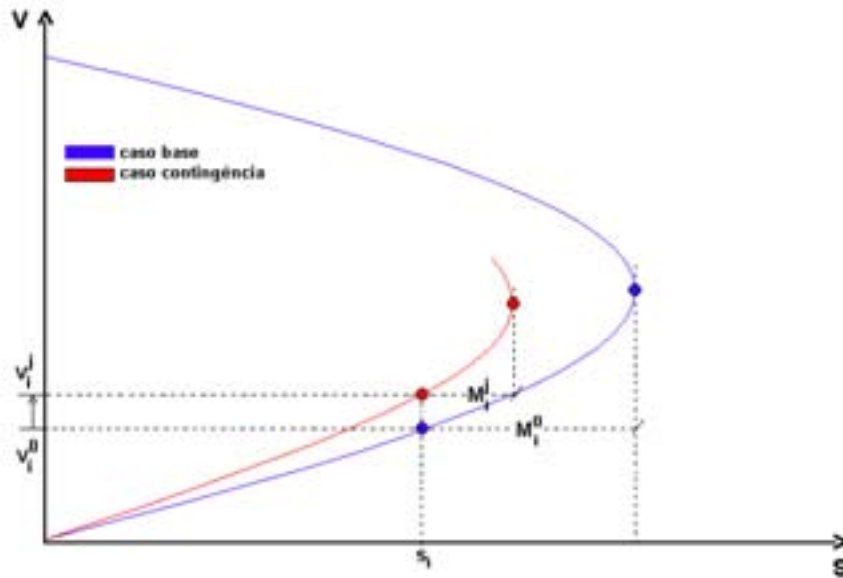


Figura 3.10(b) - Ponto de operação localizado na região anormal da curva V x P, Q do caso base e na região anormal do caso contingência com aumento de tensão final.

$$\left. \begin{array}{l} \text{Sinal de } \beta_i^0 < 0 \\ M_i^0 < 0 \\ M_i^j < 0 \\ |M_i^0| > |M_i^j| \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Como:} \\ \text{logo:} \end{array} \quad \begin{array}{l} IS_i^j = (\text{Sinal de } \beta_i^0) \times \left(\frac{M_i^j}{M_i^0} - 1 \right) \\ IS_i^j > 0 \end{array}$$

O IS_i^j apresenta valores positivos e o ponto de operação no caso contingência permanece ainda na região anormal de operação, porém apresenta um aumento de tensão em relação ao ponto de operação no caso base anterior. Nesse caso considera-se que a contingência melhorou a situação do caso base, já que o IS_i^j é positivo, porém o sistema ainda se encontra em situação de risco.

Pela Figura 3.10(c), pode-se observar que neste caso, também houve uma melhora da margem: houve um aumento da tensão e o ponto de operação no caso base, que se encontrava na região anormal de operação, migrou para a “ponta do nariz” no caso contingência.

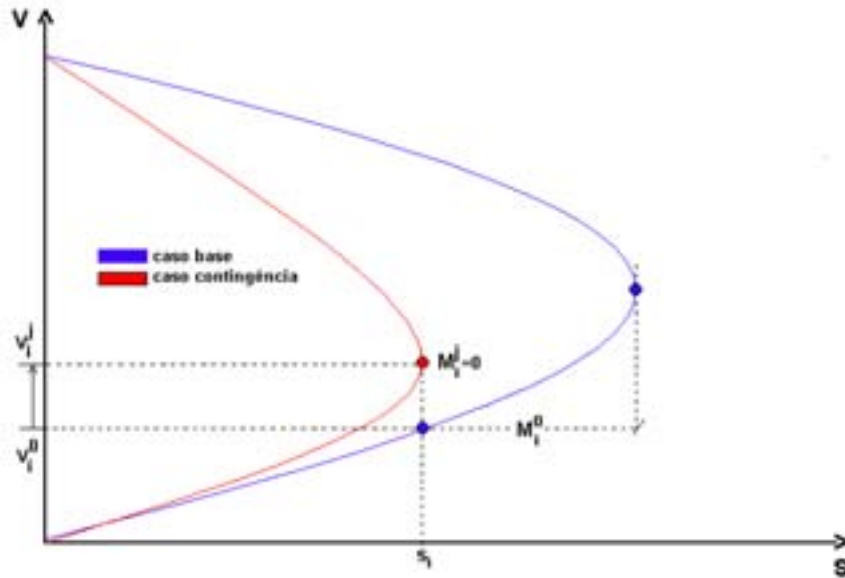


Figura 3.10(c) - Ponto de operação localizado na região anormal da curva V x P, Q do caso base e na “ponta do nariz” do caso contingência com aumento de tensão final.

$$\left. \begin{array}{l} \text{Sinal de } \beta_i^0 < 0 \\ M_i^0 < 0 \\ M_i^j = 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Como: } IS_i^j = (\text{Sinal de } \beta_i^0) \times \left(\frac{M_i^j}{M_i^0} - 1 \right) \\ \text{Logo: } IS_i^j = 1, \text{ houve uma melhora do caso base} \\ \quad (IS_i^j > 0) \end{array}$$

Pela Figura 3.10(d), pode-se observar, sem dificuldade, que o caso contingência foi extremamente benéfica ao ponto de operação do caso base, migrando-o para a região normal de operação.

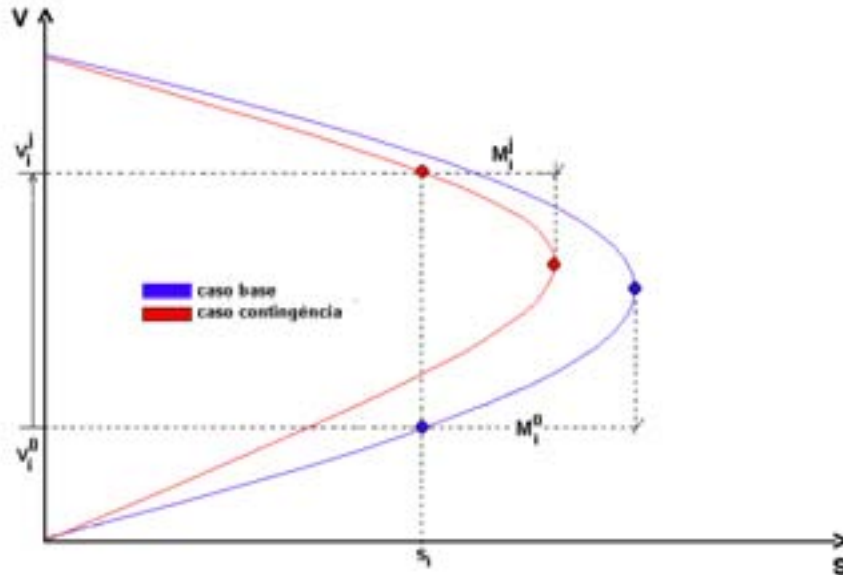


Figura 3.10(d) - Ponto de operação localizado na região anormal da curva V x P, Q do caso base e na região normal de operação do caso contingência com aumento significativo de tensão final.

$$\left. \begin{array}{l} \text{Sinal de } \beta_i^0 < 0 \\ M_i^0 < 0 \\ M_i^j > 0 \\ |M_i^0| > |M_i^j| \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Como: } IS_i^j = (\text{Sinal de } \beta_i^0) \times \left(\frac{M_i^j}{M_i^0} - 1 \right) \\ \text{logo: } IS_i^j > 0 \text{ o que significa uma melhora da} \\ \text{situação do caso base.} \end{array}$$

A Figura 3.11 ilustra de uma forma geral os casos estudados nessa Seção.

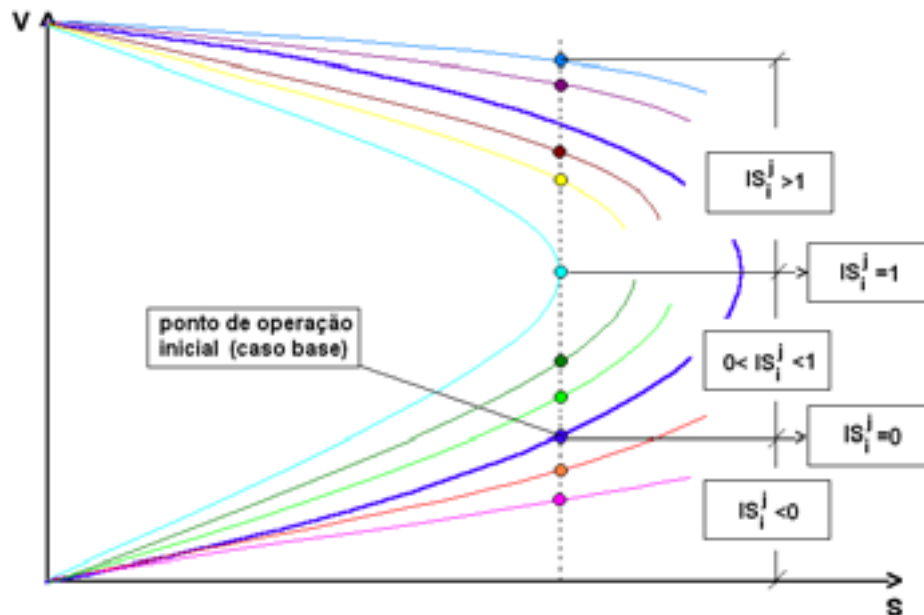


Figura 3.11 - Caso base e contingências com limites de Índices de Sensitividade

Analisando a Figura 3.11, pode-se observar que:

- Quando $IS_i^j < 0$, o ponto de operação do caso base migra para um ponto de operação no caso contingência com uma tensão inferior;
- Quando $IS_i^j = 0$, a contingência não teve influência no caso em análise;
- Quando $0 < IS_i^j < 1$ indica que houve melhora na margem de potência da barra em análise, que pode ser medida em uma escala de 0 a 1. Porém, pode-se garantir que o ponto de operação se manterá na parte inferior da curva, ou seja, na região anormal de operação;
- Quando $IS_i^j = 1$ significa que o ponto de operação está localizado na “ponta do nariz” do caso contingência;
- Quando $IS_i^j > 1$ significa que a contingência foi de tal forma benéfica que migrou o ponto de operação do caso base para a região normal de operação do caso contingência, ou seja, para a parte superior da curva $V \times P, Q$ (esse caso é raro, se é que ocorre).

3.2.3.5

Interpretação da escala do IS_i^j de acordo com o sinal de β_i^0 A) Sinal de $\beta_i^0 > 0$ 

Figura 3.12 - Escala do Grau de Severidade baseado no valor de IS_i^j , para Sinal de $\beta_i^0 > 0$

Pela Figura 3.12 e de acordo com o valor de IS_i^j , pode-se observar o seguinte:

- (1) De 0 a $+\infty$: a contingência foi benéfica melhorando a margem do caso base;
- (2) De 0 a -1 : a contingência foi prejudicial a margem do caso base, porém o ponto de operação final permanece na região normal de operação;
- (3) De -1 a $-\infty$: a contingência foi prejudicial a margem do caso base e o ponto de operação final foi para a região anormal de operação, o que não é um bom resultado

B) Sinal de $\beta_i^0 < 0$



Figura 3.13 - Escala do Grau de Severidade baseado no valor de IS_i^j , para Sinal de $\beta_i^0 < 0$

Pela Figura 3.13 e de acordo com o valor de IS_i^j , pode-se observar o seguinte:

- (1) De 0 a 1 : a contingência foi benéfica, melhorando a margem do caso base, porém o ponto de operação no caso contingência ainda continua na região anormal de operação, o que ainda não é um bom resultado;
- (2) De 1 a $+\infty$: a contingência foi benéfica melhorando a margem do caso base, porém o ponto de operação no caso contingência passou para a região normal de operação o que significa uma melhora substancial;
- (3) De 0 a $-\infty$: o ponto de operação já não era satisfatório por se encontrar na região anormal de operação. Com o evento da contingência o grau de severidade aumentou e manteve o ponto de operação no caso contingência na região anormal de operação. Esta é a pior condição de todos os casos estudados até o momento.

3.2.4

Seleção e ordenação de contingências através de avaliação de todo o sistema

Na Seção 3.2.3 foi feito uma análise nodal, onde verificou-se a influência de contingências sobre cada uma das barras separadamente. Nessa seção será analisada a influência de contingências sobre todo o sistema e o critério utilizado na Seção 3.2.3 também será empregado nessa seção para verificar os efeitos causados pelas contingências nas margens de potência de todas as barras através dos Índices de Sensitividade.

Para melhor evidenciar a importância relativa entre as barras do sistema, serão analisadas duas maneiras de selecionar e ordenar as contingências: primeiramente, sem considerar o grau de importância entre barras e em seguida, levando esse fator em consideração.

3.2.4.1

Ordenação de contingências utilizando o Índice de Sensitividade para todo o sistema (sem considerar a importância relativa entre barras)

Pode-se comparar o comportamento de todo o sistema em relação a um caso base e um caso contingência, quando o sistema é submetido a uma contingência #j e as diversas margens de cada uma das barras sofrerem variações.

A contingência mais severa para todo o sistema será aquela que apresentar o valor mais negativo do somatório de todas as reduções das margens das barras do sistema (considerando que as reduções são negativas).

Esse somatório será chamado de Índice de Sensitividade da contingência #j para todo o sistema e definido como:

$$IS_s^j = \sum_i IS_i^j$$

Como já foi visto na Seção 3.2.3, referente a análise nodal, IS_i^j é o Índice de Sensitividade da contingência #j sobre a barra i, ou seja, a redução da margem de potência da barra i, em relação ao caso base.

Assim, o IS_s^j é o somatório de todas as reduções das margens de potência causadas pela contingência #j nas i barras do sistema, em relação ao caso base.

Considera-se um caso base e duas contingências, #k e #q. Se $IS_s^k = \sum_i IS_i^k$, $IS_s^q = \sum_i IS_i^q$ e $IS_s^k < IS_s^q$, então a contingência #k atua de forma mais severa sobre o sistema do que a contingência #q. Logo, através do índice IS_s^j , pode-se classificar as diversas contingências por ordem de severidade.

Entretanto, a localização da contingência e a importância das barras adjacentes a ela podem influenciar a forma localizada ou distribuída da redução total da margem de potência de todo o sistema (IS_s^j).

Será mostrado a seguir, que é importante se definir um índice que leve em consideração a influência da contingência em determinadas barras, com relação a localização do evento e a importância relativa entre as barras.

Para ilustrar o que foi exposto, supõe-se uma contingência #r que de acordo com sua localização e característica cause redução de margem de forma acentuada em uma ou mais barras do sistema com alto grau de importância e pequenas reduções não significativas nas demais barras menos importantes.

Supõe-se ainda que outra contingência #t afete o sistema de forma mais distribuída, ou seja, cause pequenas reduções das margens de transferência de potência em quase todas as barras do sistema. Se $IS_s^t < IS_s^r$, então a contingência #t deve ser classificada com um grau de severidade maior que a contingência #r. Todavia parece óbvio que a contingência #r que afetou uma ou mais barras importantes do sistema causando nessas barras uma grande redução de suas margens de transferência de potência, a ponto de comprometer de forma incisiva a segurança de tensão, deveria ser considerada mais severa e prejudicial ao sistema do que a contingência #t, que apesar de provocar uma redução maior pelo somatório das margens, o fez de forma distribuída entre as diversas barras do sistema sem alterar de forma significativa a segurança de tensão do sistema como um todo.

Por esse motivo deve-se atribuir a cada uma das barras do sistema um índice que atue como um peso de maneira que acentue a devida importância de cada barra. Esse índice será discutido a seguir, na Seção 3.2.4.2, onde serão analisadas a seleção e ordenação de contingências, considerando a importância relativa entre as barras.

3.2.4.2

Ordenação de contingências utilizando o Índice de Sensitividade para todo o sistema (considerando a importância relativa entre barras)

Quando o sistema é submetido a uma contingência #j, as diversas margens de cada uma das barras irão sofrer variações de acordo com a localização da contingência e a importância das barras adjacentes.

Considera-se que, no caso base, quanto maior é a potência máxima que pode ser injetada em uma barra ($S_{m_i}^0$), mais importante é essa barra em relação as demais barras do sistema[3].

Seja $S_{m_k}^0$ a potência máxima que pode ser injetada na barra k, no caso base, e $S_{m_k}^0 > S_{m_i}^0$, para qualquer barra i do sistema. Defini-se como Índice de Importância da barra i:

$$\Pi_i = \frac{S_{m_i}^0}{S_{m_k}^0}$$

Diante do exposto, o índice IS_S^j é redefinido e passa para a seguinte forma:

$$IS_S^j = \sum_i (IS_i^j * \Pi_i)$$

onde:

IS_s^j : Índice de Sensitividade do sistema para o caso contingência #j

IS_i^j : Índice de Sensitividade da barra i para o caso contingência #j

II_i : Índice de Importância da barra i

Após a introdução do conceito do Índice de importância das barras, o índice IS_s^j passou a representar, de uma forma mais precisa, uma grandeza que pode ser utilizada para ordenação por severidade das diversas contingências de uma lista, refletindo com maior propriedade as influências de cada contingência sobre todo o sistema.

3.2.4.3

Seleção de contingências utilizando um Índice Crítico de Sensitividade para todo o sistema (IS_s^C)

Para selecionar contingências levando em consideração todo o sistema, deve-se definir critérios preestabelecidos pelo usuário, relacionados aos limites de redução das margens, que irão resultar em um índice crítico, da mesma forma que foi feito na Seção 3.2.3.2 para análise nodal.

Defini-se esse índice crítico como IS_s^C e, da mesma maneira que se procedeu na análise nodal, serão descartadas todas as contingências com $IS_s^j > IS_s^C$ e selecionadas todas aquelas com $IS_s^j < IS_s^C$.

Ainda seguindo o mesmo critério da análise nodal, a ordenação das contingências selecionadas por ordem de severidade é feita pelo IS_s^j , considerando-se que a contingência mais crítica é aquela que possui o índice IS_s^j mais negativo.

