

2 Principais Metodologias Existentes

Foram estudados vários métodos capazes de selecionar e ordenar por grau de severidade as contingências de uma grande lista com possibilidade de ocorrência e reduzir o número de contingências a serem analisadas.

Desses métodos foram destacados três que mereceram destaque especial, e serão analisados a seguir.

2.1

Método RSI - "Reactive Suport Index" (Índice de Suporte Reativo) e/ou IF - "Iterative Filtering" (Filtragem Iterativa)

Esse método tem como objetivo reduzir uma grande lista de contingências a uma lista compacta, cujo número de contingências pode ser definido de acordo com o interesse do usuário. Tal lista contém as contingências que realmente podem ameaçar a segurança da estabilidade de tensão do sistema ordenadas por grau de severidade.

A forma que esse método adota para pesquisar a seleção de contingências é usar um índice chamado "Reactive Suport Index" (Índice de Suporte Reativo), o qual passará a ser referenciado como RSI.

O "Iterative Filtering" é um método que se processado em conjunto com o RSI, permite identificar exatamente um número específico de contingências críticas determinado pelo usuário, como também é usado para checar a seleção e ordenação com base no RSI.

Ambas as técnicas são baseadas em cálculos de fluxo de carga. É importante frisar que para a utilização de técnicas que se utilizam de cálculos de fluxo de

carga, os modelos devem ser escolhidos apropriadamente, como a curva de capacidade de geradores, os de carga, os de ações de ULTC etc, no sentido de se obter resultados mais precisos. A utilização de resultados de fluxo de carga nas técnicas aqui estudadas, justifica-se por ser uma forma de solução primária na avaliação da segurança de tensão. Na maioria das vezes se tem um grande volume de casos que precisam ser examinados on-line, e portanto, de forma rápida. Nesta seção serão mostrados somente os itens julgados mais importantes de [4].

2.1.1.

RSI - "Reactive Suport Index"

O RSI é uma evolução do índice de severidade, baseado na geração reativa [5,6] e em outro método chamado "Reactive Compensation Index" (Índice de Compensação Reativa), o qual passará a ser referenciado como RCI.

O método RCI é baseado na premissa que a distância entre o "nariz" da curva Q-V do caso normal (pré-contingência) e o "nariz" da curva Q-V do caso contingência pode ser estimada pelo total de injeção de reativos requeridos nas barras de carga de modo a se estabelecer níveis de tensões similares para ambos os casos, sempre atendendo a mesma carga. A potência reativa extra gerada é suprida por fontes fictícias de var inseridas nas barras de carga, com tensão ajustada para o mesmo valor da tensão da barra. O autor apresenta a ilustração desse índice na Figura 2.1, porém essa figura não parece coincidir com o que foi definido.

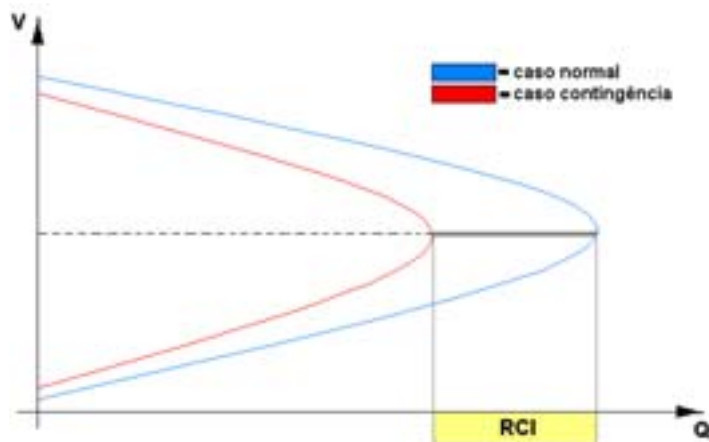


Figura 2.1 - RCI_j - Ilustração do Índice de Compensação Reativa para a barra j

Por esse motivo, a Figura 2.2 apresenta a ilustração do RCI de acordo com a premissa na qual o índice foi baseado, conforme descrito anteriormente.

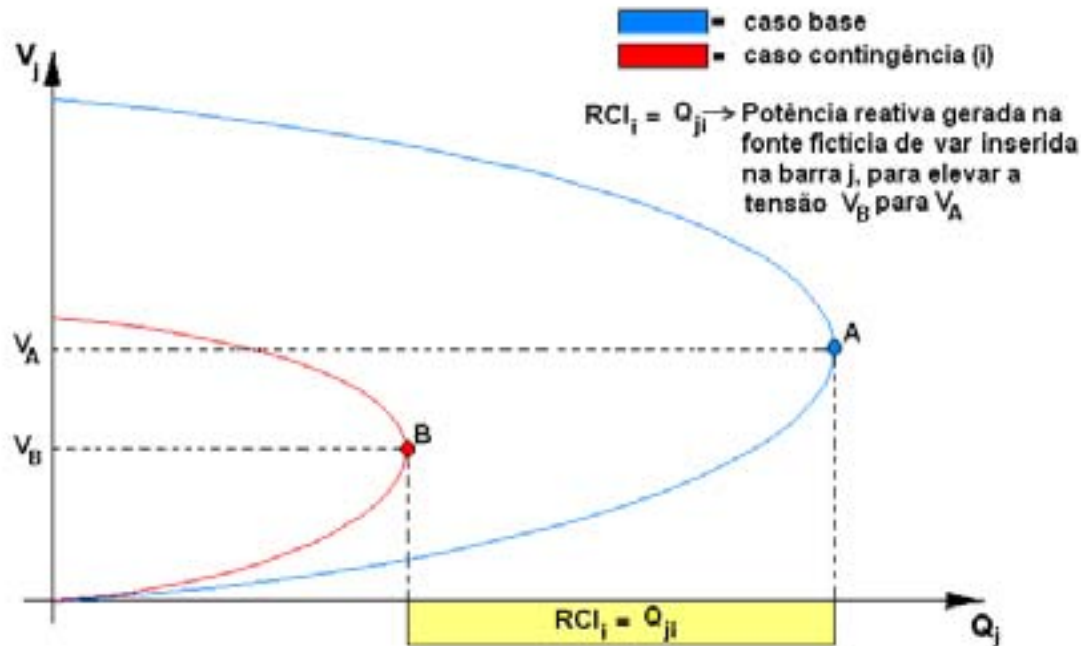


Figura 2.2 - RCI j - Ilustração do Índice de Compensação Reativa para a barra j (correção da Figura 2.1)

Pela Figura 2.2, observa-se que, após a contingência, a “ponta do nariz” da curva passa para o ponto B, isto é, com a contingência não é mais possível atender à carga referente ao ponto A. Após a contingência, quando os condensadores síncronos fictícios começarem a gerar potência reativa, a tensão se eleva até alcançar a mesma tensão anterior, a do caso base, atendendo a carga original do caso base. Nesse momento a “ponta do nariz” da curva volta para o ponto A. A quantidade de reativos requeridos para se manter o mesmo nível de tensão tanto no caso base quanto no caso pós-contingência (Q_{ji}) é considerada como uma aproximação da distância entre o ponto A (caso base) e o ponto B (caso contingência) na barra j . O somatório, durante a contingência i , de toda potência reativa gerada nas fontes fictícias de var de cada uma das barras é denominado de RCI_i .

Com relação ao índice RCI, é importante frisar que pode ser criada uma distorção do modo de instabilidade de tensão do sistema se o condensador síncrono fictício estiver localizado na barra de carga mais próxima da contingência tendendo a prover uma maior parte do suporte de potência reativa.

Passos necessários para implementação do RCI:

- (1) Obter um ponto no nariz da curva ou um caso bem carregado, próximo da “ponta do nariz”;
- (2) Inserir condensadores síncronos fictícios nas barras de carga com tensão ajustada para o mesmo valor da barra de carga;
- (3) Aplicar a contingência;
- (4) Executar o fluxo de carga;
- (5) Determinar a injeção de reativos dos condensadores fictícios;
- (6) Definir o índice RCI, da seguinte forma:

$$RCI_i = \sum_{j=1}^{\ell} m_j Q_{ji}$$

onde:

RCI_i : Índice RCI relativo a contingência (i)

Q_{ij} : Potência reativa gerada na fonte fictícia de var inserida na barra (j), durante a contingência (i)

ℓ : Número total de barras de carga

m_j : Peso dado a fonte de var inserida na barra (j)

Esse método foi mais tarde substituído pelo RSI que provou ter melhor desempenho (precisão, velocidade e facilidade de implementação em relação ao RCI).

O RSI é baseado na premissa de que se pode definir o índice de severidade para a contingência, a partir da quantidade extra de potência reativa requerida para voltar a atender à carga original do caso base na presença da contingência, mesmo com outro valor de tensão. Ao contrário do RCI que necessita de fontes fictícias de potência reativa nas barras de carga, o RSI é definido como a quantidade extra de potência reativa gerada a partir de unidades de geração de var (gerador, SVC,

etc) existentes no sistema. Para estabelecer a geração extra de potência reativa, os limites reativos dessas unidades são ignorados. A ilustração do RSI, como na Figura 2.3, igual a que aparece no artigo [4], parece não estar de acordo com a definição apresentada para esse índice.

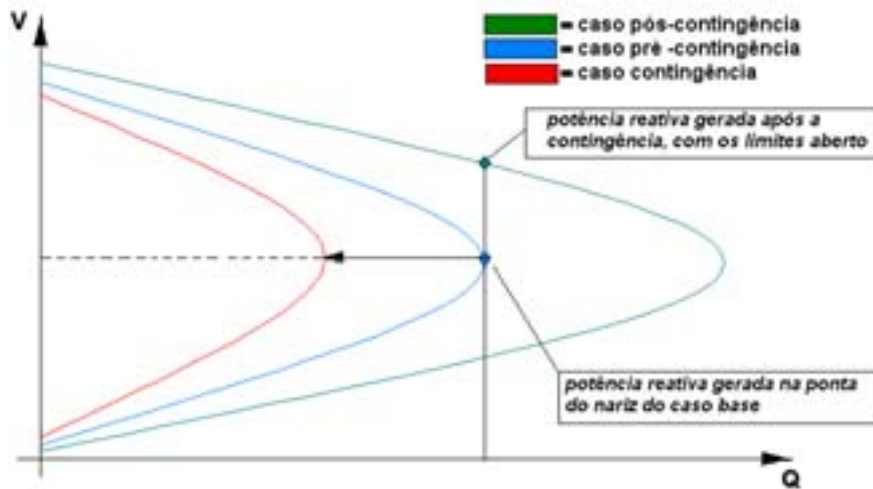


Figura 2.3 - Ilustração do Índice de Suporte Reativo para barra j

A Figura 2.4 mostra a quantidade extra de potência reativa injetada na barra p que foi gerada pelas unidades de geração var com seus limites de reativos abertos.

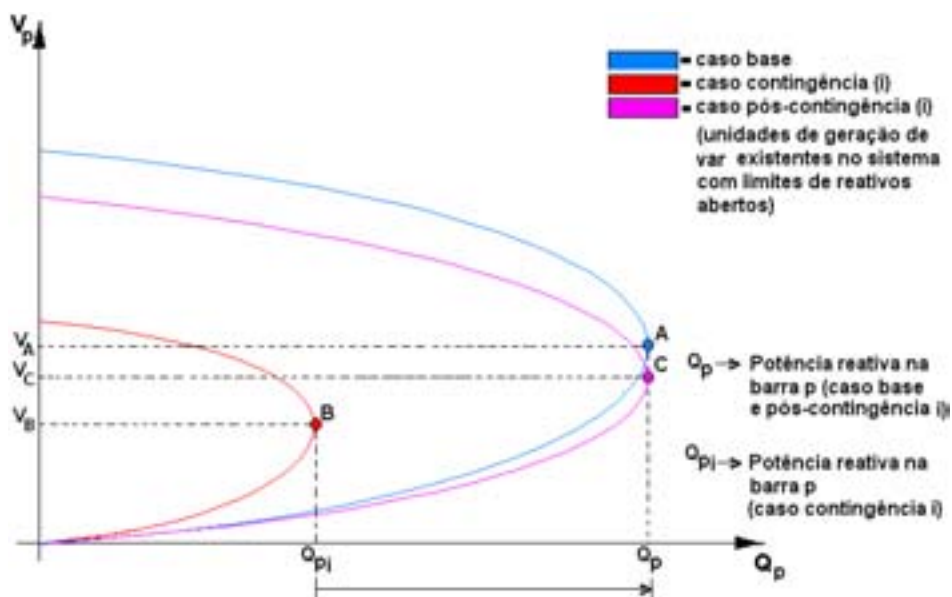


Figura 2.4 - Quantidade extra de potência reativa utilizada pela barra p na pós-contingência

Durante a contingência i , o ponto A, no caso base, passa para o ponto B e a tensão na barra p cai de V_A para V_B . Isto considerando-se que, devido à contingência e , fixando-se os valores das potências reativas geradas, a carga original do caso base, referente ao ponto A, não pode mais ser atendida. A máxima carga que pode ser atendida refere-se ao ponto B. No caso pós-contingência, a barra p , em virtude dos limites de reativos abertos das unidades de geração var existentes no sistema, conta com uma quantidade extra de potência reativa necessária para permitir atender a diferença $(Q_p - Q_{pi})$. A tensão na barra p se eleva de V_B para V_C (usualmente $V_C < V_A$).

O somatório da potência extra gerada nas unidades de var existentes no sistema com seus respectivos limites de reativos abertos é denominado de RSI $_i$ (Índice de Suporte Reativo para a contingência i).

O RSI é calculado da seguinte forma:

- (1) Obter um ponto no nariz da curva ou um caso bem carregado, próximo da “ponta do nariz”;
- (2) Implementar a contingência;
- (3) Executar o fluxo de carga com os limites das unidades de reativos abertos;
- (4) Definir o RSI como:

$$RSI_i = \sum_{j=1}^g [m_j (Q_j - Q_{ji})^p]$$

onde:

RSI $_i$: Índice RSI relativo a contingência (i).

Q_j : Potência reativa gerada na j^a unidade de var na pré-contingência.

Q_{ji} : Potência reativa gerada na j^a unidade de var na pós-contingência(i) com os limites reativos das unidades abertos.

g : Número total de unidades de var.

m_j : Peso dado a unidade de var.

p : Fator que indica a ordem do índice

Na implementação do RSI, os melhores resultados foram obtidos, para $p=1$ e normalização da geração reativa em diferentes unidades baseadas em seus Q_{\max} , ou seja, $m_j = \frac{1}{Q_{\max}}$.

Aparentemente, a fórmula do RSI_i está errada. Parece razoável inverter a posição dos termos Q_j e Q_{ji} .

O RSI usa a “ponta do nariz” da curva do caso base do sistema e ordena as contingências baseando-se na injeção extra de reativo exigida em cada uma das unidades de var para executar o fluxo de carga. O gasto computacional para ordenar as contingências é de aproximadamente 1 fluxo de carga para cada contingência e o percentual de acerto na classificação é de 70 %.

Está implícito que o fluxo de carga converge com qualquer contingência, o que nem sempre é verdade.

Constatou-se que esse método classifica erradamente algumas contingências locais que necessitam de pequeno suporte reativo, ao contrário de problemas de tensão de grandes sistemas que necessitam de grande quantidade de suporte reativo.

Além desse método de seleção e ordenação, ainda há um outro método que processado em conjunto com o RSI permite identificar exatamente um número específico de contingências críticas conforme determinado pelo usuário. Esse método chama-se "ITERATIVE FILTERING" (Filtro Iterativo), o qual passará a ser referenciado como IF.

2.1.2.

IF - "Iterative Filtering" usando o Método de Correção de Newton

O IF foi desenvolvido para assegurar que não haja erro de classificação de contingências críticas realmente perigosas à estabilidade de tensão do sistema. Um algoritmo é empregado para filtrar as contingências até se chegar a um número especificado de contingências que, para um determinado nível de carregamento, podem oferecer perigo à segurança da tensão.

A Figura 2.5 ilustra o princípio básico do "Iterative Filtering", onde é mostrado a curva Q-V de um caso base sem influências de contingências e uma série de curvas Q-V de contingências aplicadas a esse caso.

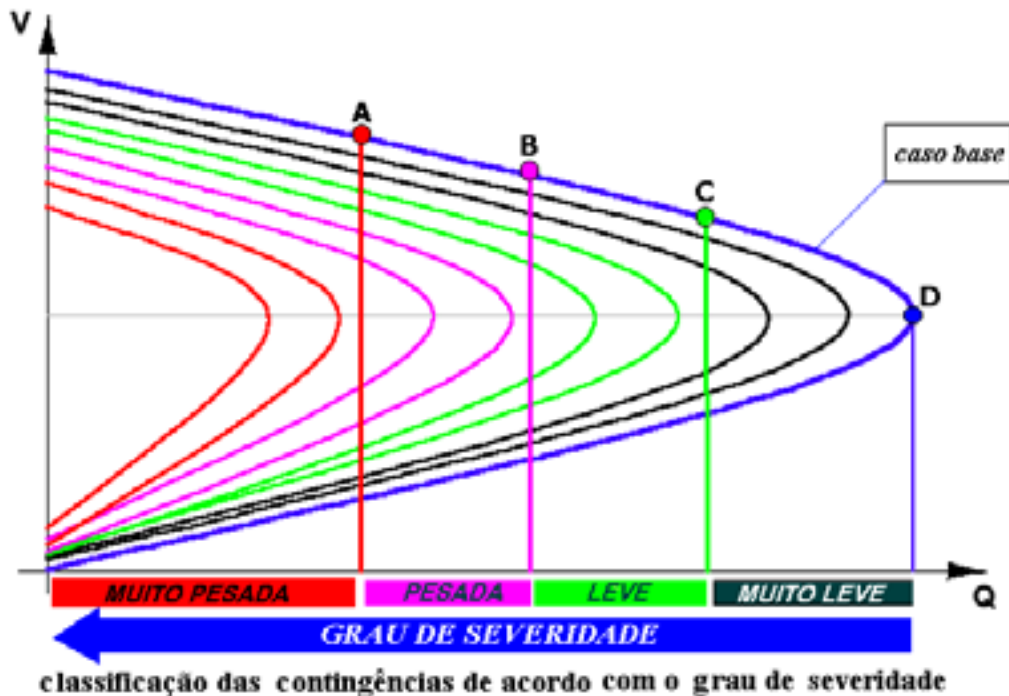


Figura 2.5 – Classificação das contingências pelo "Iterative Filtering"

Quanto mais próximo a curva Q-V pós-contingência estiver da curva do caso base, menor é a severidade da contingência, e vice-versa, ou seja, quanto mais afastada a curva Q-V pós-contingência estiver da curva do caso base (a esquerda da curva normal) maior é a severidade da contingência. Baseado nesse argumento, a área pode ser arbitrariamente dividida em 4 segmentos, MUITO PESADA, PESADA, LEVE E MUITO LEVE, que indicam o grau de severidade das contingências, de acordo com o enquadramento nesses segmentos.

Na Figura 2.5, para identificar as contingências classificadas como "MUITO LEVE", um fluxo de carga com carregamento correspondente ao caso normal no ponto C deverá ser executado para diferentes contingências. Apenas os fluxos de carga correspondentes às caracterizadas como "MUITO LEVE" irão convergir, já que as curvas Q-Vs correspondentes a esses fluxos de carga cortam a linha vertical que representa o carregamento no ponto C. Os que não convergiram, passarão a convergir se o carregamento usado para o fluxo de carga

correspondente ao caso base for aquele indicado pelo ponto B, logo, somente as contingências consideradas "LEVES" passarão também a convergir, e assim por diante. Portanto dado um caso de pré-contingência, com um determinado nível de carregamento, haverá um único grupo de contingências que não serão capazes de convergir. Além disso, a proporção que aumenta o nível de carregamento, o número de casos de contingências que não convergirão irá aumentar. Esse fato pode ser usado como princípio básico para a filtragem de contingências.

A questão-chave no algoritmo é sugerir um caso base com carregamento específico que filtre exatamente um número n especificado pelo usuário, das contingências mais críticas (por exemplo, $n = 20$). Para achar esse carregamento específico a ser utilizado no fluxo de carga do caso base submetido a cada uma das demais contingências, procede-se da seguinte maneira: Um caso inicial de carregamento na pré-contingência é começado e o número de fluxos de carga não convergentes é anotado. Isso é repetido para outros níveis de carregamento e o processo iterativo prossegue, utilizando interpolação e extrapolação, até que se chegue a um número exato, dentro da tolerância aceitável. Deve-se notar que, em geral, a maioria das contingências está na categoria " MUITO LEVE " e portanto depois da primeira iteração, o número de fluxos de carga convergentes será significativamente menor que o número original de contingências. Essa Filtragem Iterativa utiliza o Método de Correção de Newton, o qual será descrito a seguir.

Os passos para implementação do método de Filtragem Iterativa pelo Método de Correção de Newton são os seguintes:

- (1) Usar o fluxo de carga do caso base (caso com 0 % de carregamento) para obter o nariz da curva Q-V (com 100 % de carregamento);
- (2) Obter um caso com carregamento de m_i % (começar com um valor bem alto, por exemplo: $m_1 = 90$ %);
- (3) Executar o fluxo de carga, para o caso, com cada uma das contingências que não convergiram no caso anterior e estabelecer d_i , ou seja, número de contingências que não convergiram na iteração i ;

- (4) Se $(n - t) < d_i < (n + t)$, então parar, senão ir para o passo 5;
 n : número especificado no início do processo (contingências mais críticas);
 t : tolerância
- (5) Modificar m_i para $m_{i+1} = m_i + \Delta m_i$, onde Δm_i é obtido pela interpolação (extrapolação) dos dois últimos valores, conforme abaixo. Na primeira iteração deve-se fixar um valor para Δm_i (ex.: 10 %);

$$\Delta m_i = \frac{(n - d_i)(m_i - m_{i-1})}{(d_i - d_{i-1})}$$

- (6) Repita o processo a partir do passo 2.

A Tabela 2.1 mostra os resultados do IF para o sistema da BC Hydro.

Tabela 2.1 - Resultados do IF pelo Método de Correção de Newton para o sistema da BC Hydro

Iteração (i)	Carregamento (%) (m_i)	Fluxos de Carga	Fluxos de Carga convergentes	Fluxos de Carga não convergentes (d_i)
1	90	670	583	87
2	80	87	50	37
3	76,6	37	5	32
4	68,5	32	5	27
5	57,2	27	3	24

O número n de contingências a serem filtradas de uma lista inicial de 670 contingências é de 20 contingências mais perigosas para o sistema. A tolerância adotada t é de 5 contingências. Iniciando os cálculos tem-se:

(1) m_1 adotado = 90 %;

(2) $d_1 = 87$ (ver tabela 2.1);

(3) Se $(n - t) < d_1 < (n + t)$, ou seja,

Se $(20 - 5) < 87 < (20 + 5)$, então "parar", senão ir para o próximo passo;

(4) $\Delta m_1 = -10$ %

(5) $m_2 = m_1 + \Delta m_1 \rightarrow m_2 = 90 + (-10) \rightarrow m_2 = 80$ %

(1) $m_2 = 80$ %;

(2) $d_2 = 37$ (ver tabela 2.1);

(3) Se $(n - t) < d_2 < (n + t)$, ou seja,

Se $(20 - 5) < 37 < (20 + 5)$, então "parar", senão ir para o próximo passo;

(4)
$$\Delta m_2 = \frac{(n - d_2)(m_2 - m_1)}{(d_2 - d_1)}$$

$$\Delta m_2 = \frac{(20 - 37)(80 - 90)}{(37 - 87)}$$

$$\Delta m_2 = -3,4$$

(5) $m_3 = m_2 + \Delta m_2 \rightarrow m_3 = 80 + (-3,4) \rightarrow m_3 = 76,6$ %

(1) $m_3 = 76,6 \%$;

(2) $d_3 = 32$ (ver tabela 2.1);

(3) Se $(n - t) < d_3 < (n + t)$, ou seja,

Se $(20 - 5) < 32 < (20 + 5)$, então "parar", senão ir para o próximo passo;

(4)
$$\Delta m_3 = \frac{(n - d_3)(m_3 - m_2)}{(d_3 - d_2)}$$

$$\Delta m_3 = \frac{(20 - 32)(76,6 - 80)}{(32 - 37)}$$

$$\Delta m_3 = -8,16$$

(5) $m_4 = m_3 + \Delta m_3 \rightarrow m_4 = 76,6 + (-8,16) \rightarrow m_4 = 68,44 \%$

(1) $m_4 = 68,44 \%$;

(2) $d_4 = 27$ (ver tabela 2.1);

(3) Se $(n - t) < d_4 < (n + t)$, ou seja,

Se $(20 - 5) < 27 < (20 + 5)$, então "parar", senão ir para o próximo passo;

(4)
$$\Delta m_4 = \frac{(n - d_4)(m_4 - m_3)}{(d_4 - d_3)}$$

$$\Delta m_4 = \frac{(20 - 27)(68,44 - 76,6)}{(27 - 32)}$$

$$\Delta m_4 = -11,42$$

(5) $m_5 = m_4 + \Delta m_4 \rightarrow m_5 = 68,44 + (-11,42) \rightarrow m_5 = 57,02 \%$

-
- (1) $m_5 = 57,02 \%$;
 - (2) $d_5 = 24$ (ver tabela 2.1);
 - (3) Se $(n - t) < d_5 < (n + t)$, ou seja,

Se $(20 - 5) < 24 < (20 + 5)$, então "parar", senão ir para o próximo passo.

Portanto, começando com um caso de carregamento de 90 % na primeira iteração, dentre 670 contingências, 87 não convergem. De 87, 50 contingências convergiram na segunda iteração até a iteração número 5 onde o número de contingências não convergentes é 24. A tolerância usada foi de 5 contingências. Nota-se que o número de fluxos de carga necessários a esse caso foi de 853, o que representa 1,27 vezes o número total de contingências.

Pela Figura 2.6 pode-se observar que a rampa entre as duas últimas soluções é usada para definir o próximo carregamento intermediário .

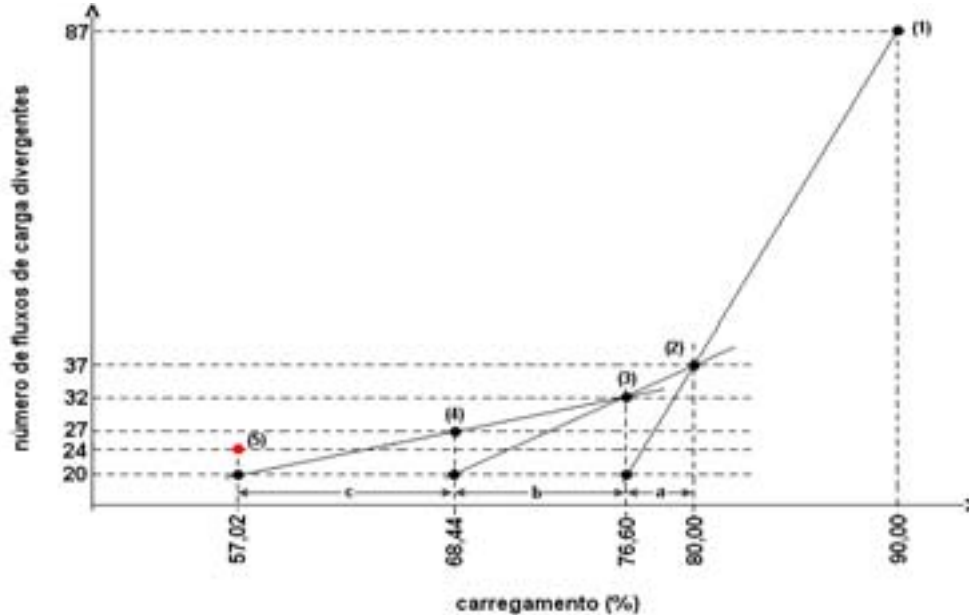


Figura 2.6 - Rampas utilizadas no "Iterative Filtering" pelo Método de Correção de Newton

Os cálculos para se definir os níveis de carregamento a cada iteração pode ser observado com mais clareza pelas 3 principais operações mostradas a seguir e pela Figura 2.6:

$$\frac{87-37}{90,00-80,00} = \frac{37-20}{a} \therefore a = 3,4 \rightarrow \text{novocarregamento} \Rightarrow 80,00-3,4 = 76,60$$

$$\frac{37-32}{80,00-76,60} = \frac{32-20}{b} \therefore b = 8,16 \rightarrow \text{novocarregamento} \Rightarrow 76,60-8,16 = 68,44$$

$$\frac{32-27}{76,60-68,44} = \frac{27-20}{c} \therefore c = 11,42 \rightarrow \text{novocarregamento} \Rightarrow 68,44-11,42 = 57,02$$

Outro caso será analisado para efeito de exemplo numérico e para que se tenha condições de comparação entre o IF pelo Método de Correção de Newton e o IF pelo Método da Bisseção, que será estudado na Seção 2.1.3.

Portanto, um sistema equivalente sul-sudeste do Sistema Interligado Nacional foi escolhido como exemplo e seu unifilar e as contingências consideradas para esse caso encontram-se no apêndice A. O carregamento do sistema foi baseado no aumento de carga da barra 29, com fator de potência constante. O número n de contingências a serem filtradas de uma lista de 11 contingências é de 2 contingências mais severas. Por se tratar de uma lista com poucas contingências, a tolerância adotada será nula. A Tabela 2.2 mostra os resultados obtidos na execução do "Iterative Filtering" pelo Método de Correção de Newton.

Tabela 2.2 - Resultados do IF pelo Método de Correção de Newton para o sistema equivalente sul-sudeste do Sistema Interligado Nacional

Iteração (i)	Carregamento (%) (m _i)	Fluxos de Carga	Fluxos de Carga convergente	Fluxos de Carga não convergentes (d _i)
1	90	11	7	4
2	80	4	4	0
3	85	4	3	1
4	86,67	3	2	1

Os cálculos para se definir os níveis de carregamento a cada iteração, pelo Método de Correção de Newton podem ser visualizados de uma forma mais clara pela Figura 2.7 e pelos cálculos a seguir:

$$\frac{4-0}{90,00-80,00} = \frac{2-0}{a} \quad \therefore a = 5,00 \rightarrow \text{novo carregamento} \Rightarrow 80,00 + 5,00 = 85,00$$

$$\frac{4-1}{90,00-85,00} = \frac{2-1}{b} \quad \therefore b = 1,67 \rightarrow \text{novo carregamento} \Rightarrow 85,00 + 1,67 = 86,67$$

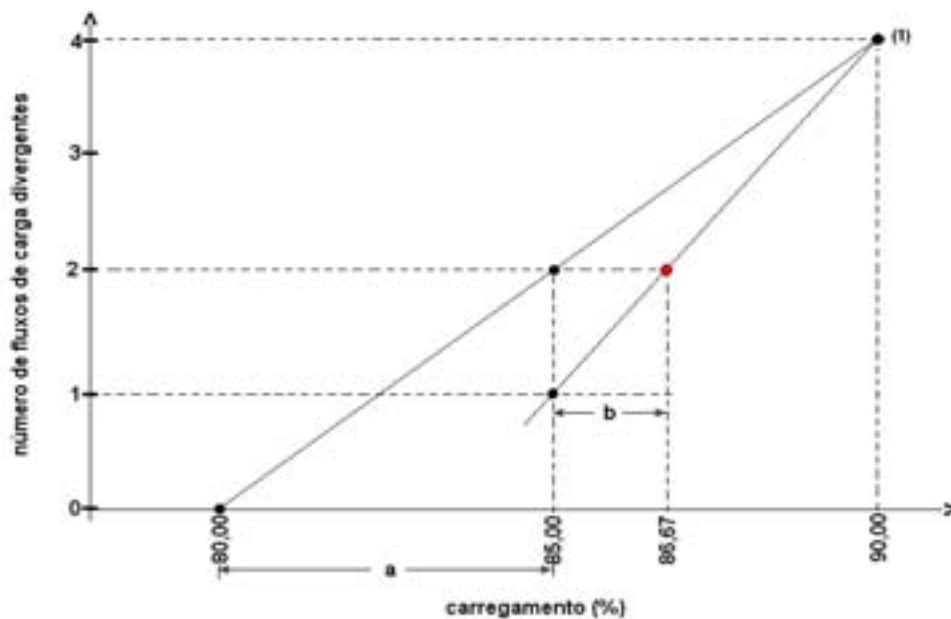


Figura 2.7 - Rampas utilizadas no "Iterative Filtering" pelo Método de Correção de Newton.

Pela Figura 2.8 pode-se observar que começando com um caso de carregamento de 90 % na primeira iteração, dos 11 fluxos de carga, apenas 4 não tiveram solução. Na segunda iteração, com um carregamento de 80 %, os 4 fluxos de carga convergiram. Na terceira iteração, com o aumento do carregamento para 85 %, dos 4 fluxos de carga, 1 não teve solução. Finalmente na quarta e última iteração, dos 3 fluxos de carga restantes, com um carregamento de 86,67 %, mais 1 fluxo de carga não convergiu, totalizando então, 2 fluxos de carga não convergentes, como se queria obter. Nesse caso o número de fluxos de carga necessários foi de 22, o que representa 2 vezes o número de contingências.

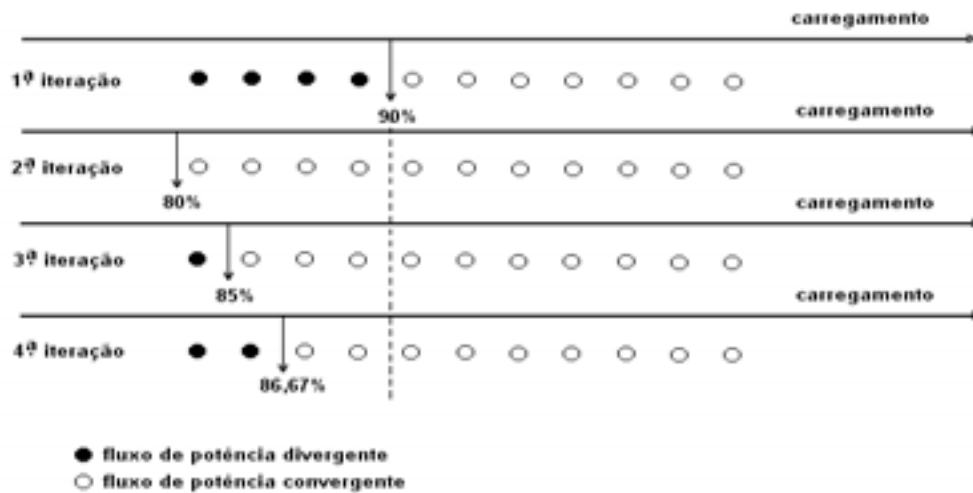


Figura 2.8 - Ilustração do "Iterative Filtering" pelo Método de Correção de Newton

O IF pode ser combinado com o método RSI, descrito na Seção 2.1.1, para filtrar e ordenar contingências, no sentido de se obter resultados mais precisos quando uma lista exata de contingências críticas seja essencial. Em cada iteração do método de filtragem, apenas aquelas contingências que convergiram são ordenadas de acordo com o método RSI através da avaliação da transferência de geração reativa das unidades de var. Mesmo no final do processo, contingências não convergentes remanescentes são ordenadas pelo RSI. Na realidade seria mais eficiente em termos de esforço computacional ordenar por meio do RSI apenas o conjunto de contingências remanescentes no final do IF, ou seja, o número de contingências, conforme especificado no início do processo, que não convergiram.

O RSI, por si só, pode ser usado em sistemas onde algum erro de classificação de contingências locais possa ser tolerado.

2.1.3

IF - "Iterative Filtering" usando o Método da Bisseção

Esse método, também conhecido como pesquisa Dicotômica ou Pesquisa Binária, é um método confiável e simples. O método pode ser usado para determinar um limite seguro de operação individual para cada contingência como também para calcular o limite seguro de operação com relação a um conjunto de contingências. Nesse caso o processo torna-se um simples e poderoso método de seleção e ordenação de contingências. O método é capaz de reduzir uma grande lista de contingências a uma lista compacta, de acordo com o nível de carregamento de interesse e com o número de contingências que deverão remanescer para uma análise mais apurada. Tais contingências consideradas mais críticas poderão ser tratadas, posteriormente, com relação a possíveis ações de controle pertinentes.

Neste capítulo, para simplificar, para um determinado nível de carregamento, uma contingência é crítica se não há solução do problema do fluxo de carga.

Nesta Seção serão mostrados somente os itens julgados mais importantes de [7].

2.1.3.1

Tratando de uma única contingência

Simplesmente, o método consiste em construir progressivamente um intervalo de carregamento $[S_\ell, S_u]$ tal que S_ℓ corresponda a um cenário estável, S_u a um cenário instável e $[S_\ell, S_u]$ é menor ou igual a uma tolerância Δ especificada. O processo inicia-se com $S_\ell = 0$ (correspondente ao caso base) e $S_u = S_{\max}$ (carregamento máximo de interesse). Divide-se o intervalo em 2 partes iguais a cada passo. Se o ponto médio resultante da divisão for considerado estável, esse ponto é tomado como o novo limite mínimo do intervalo. Se for

considerado instável, então o ponto médio é tomado como o novo limite máximo do intervalo. S_{\max} é o máximo limite de interesse.

O procedimento é ilustrado na Figura 2.9, onde os pontos pretos indicam um cenário instável e os pontos brancos indicam um cenário estável. Os arcs mostram a seqüência dos cálculos.

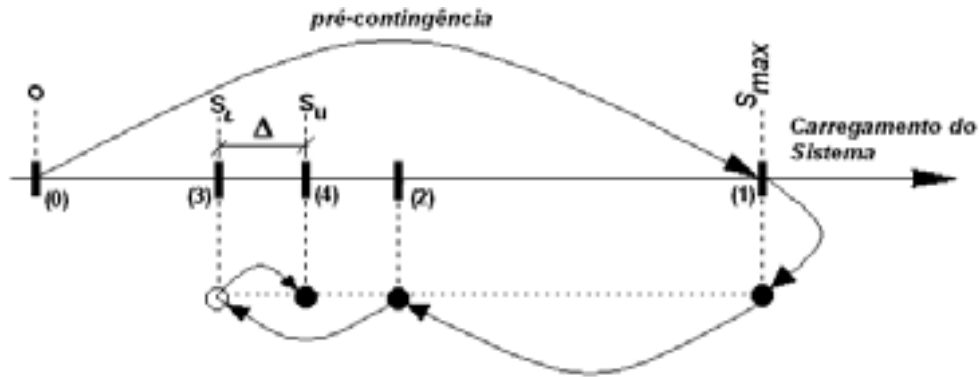


Figura 2.9 – "Iterative Filtering" utilizando o Método da Bisseção para contingência única

O intervalo adotado foi $[S_l, S_u]$ referente aos pontos (3) e (4). Porém, se na última iteração, o ponto (4) fosse estável (ponto branco), então o intervalo $[S_l, S_u]$ teria que ser definido pelos pontos (4) e (2). O próximo intervalo não pode mais ser dividido em duas partes, já que a tolerância Δ foi alcançada, e portanto o processo é interrompido.

Existem basicamente duas tarefas computacionais envolvidas no Método da Bisseção:

- 1) Simulação de Contingências
- 2) Geração de pontos de operação na pré-contingência correspondentes a vários níveis de carregamento.

2.1.3.2

Tratando de várias contingências

Quando um limite seguro de operação tem que ser calculado em relação a várias contingências, seria uma perda de tempo calcular o limite individual de cada uma das contingências para finalmente manter o menor valor como o limite global. É muito mais eficiente processar as várias contingências simultaneamente. O processo é mostrado na Figura 2.10

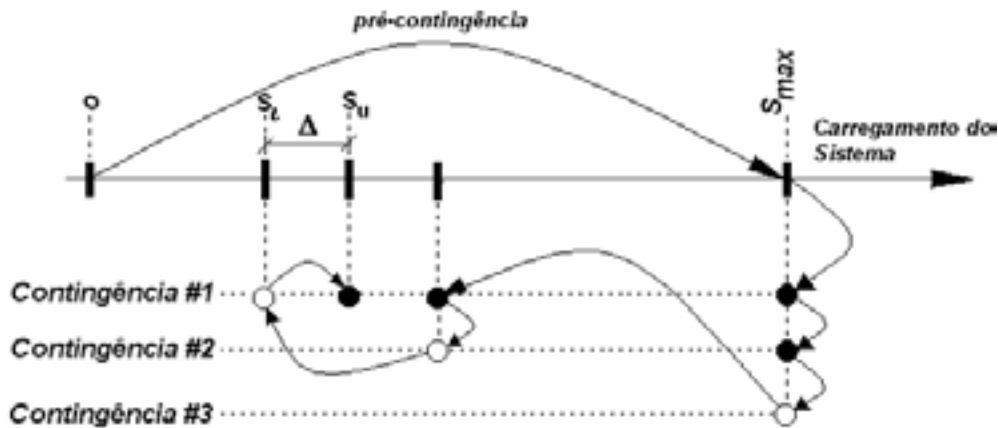


Figura 2.10 – "Iterative Filtering" utilizando o Método da Bisseção aplicado a várias contingências simultaneamente

Em um dado passo do Filtro Iterativo pelo Método da Bisseção, as várias contingências retidas no passo anterior são simuladas. Aquelas que deixam o sistema estável podem ser descartadas desde que os limites correspondentes sejam maiores que o nível de carregamento corrente. As outras farão parte da lista reduzida de contingências a serem processadas no próximo passo. A economia em termos computacionais depende, obviamente, da forma como os limites individuais são distribuídos no intervalo $[0, S_{\max}]$.

Dos diversos passos do Método da Bisseção para várias contingências, resulta a cada passo, um parâmetro interessante. Trata-se do nível de carregamento no qual a contingência (ou contingências) foi (ou foram) descartada(s). Esse parâmetro é considerado como um limite mínimo pessimista no limite de segurança individual correspondente, ou seja, não se pode garantir

que acima desse limite a contingência continuará em um cenário estável. O limite mínimo pessimista pode ser adotado como um índice que reflita o grau de severidade de contingências. Quanto menor o limite mínimo pessimista, maior o grau de severidade. Desta forma, a partir de um conjunto de contingências, submetido ao Filtro Iterativo pelo Método da Bisseção, pode-se obter dois resultados:

1. Selecionar um número n específico de contingências críticas e o seu respectivo limite seguro de operação $[S_l, S_u]$. O número n poderá ser determinado pelo usuário.
2. Ordenar as contingências do conjunto por ordem de severidade utilizando-se o limite mínimo pessimista de cada contingência ou do grupo de contingências convergentes para esse nível de carregamento.

Como exemplo e para efeito de comparação, o IF pelo Método da Bisseção será aplicado ao mesmo caso da Seção 2.1.2, referente ao sistema equivalente sul-sudeste, mantendo-se n igual a 2 e tolerância nula. A Tabela 2.3 mostra os resultados desse exemplo.

Tabela 2.3 - Resultados do IF pelo Método da Bisseção para o sistema equivalente sul-sudeste do Sistema Interligado Nacional

Iteração (i)	Carregamento (%) (m_i)	Fluxos de Carga	Fluxos de Carga convergentes	Fluxos de Carga não convergentes (d_i)
1	50	11	11	0
2	75	11	11	0
3	87,5	11	9	2

Os cálculos para se definir os níveis de carregamento a cada iteração pelo Método da Bisseção são mais simples, pois apenas é necessário dividir o intervalo em duas partes iguais a cada passo, como pode ser observado pela Figura 2.11.

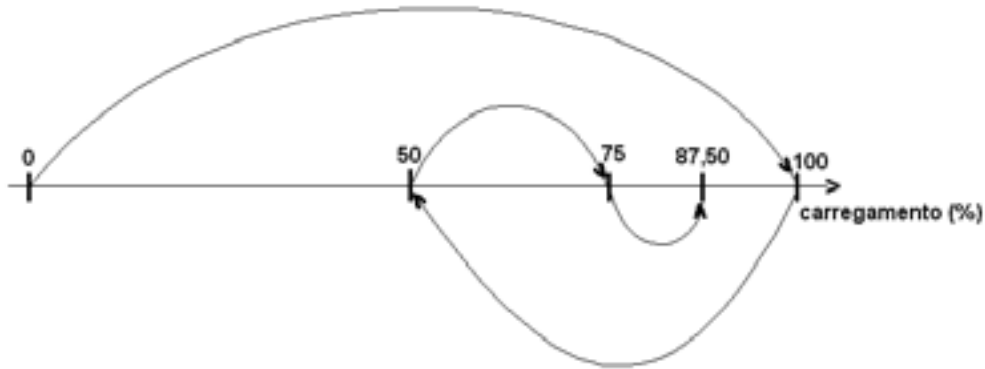


Figura 2.11 - Obtenção dos níveis de carregamento pelo "Iterative Filtering" usando o Método da Bisseção

Pela Figura 2.12 pode-se observar que começando com um caso de carregamento de 50 % na primeira iteração, nenhum fluxo de carga divergiu. Na segunda iteração, com 75 % de carregamento, também nenhum fluxo de carga divergiu. Na terceira iteração com carregamento de 87,50 %, dois fluxos de carga não convergiram, atingindo o valor de $n=2$, como se queria obter. Nesse caso o número de fluxos de carga necessários foi de 33 o que representa 3 vezes o número de contingências.

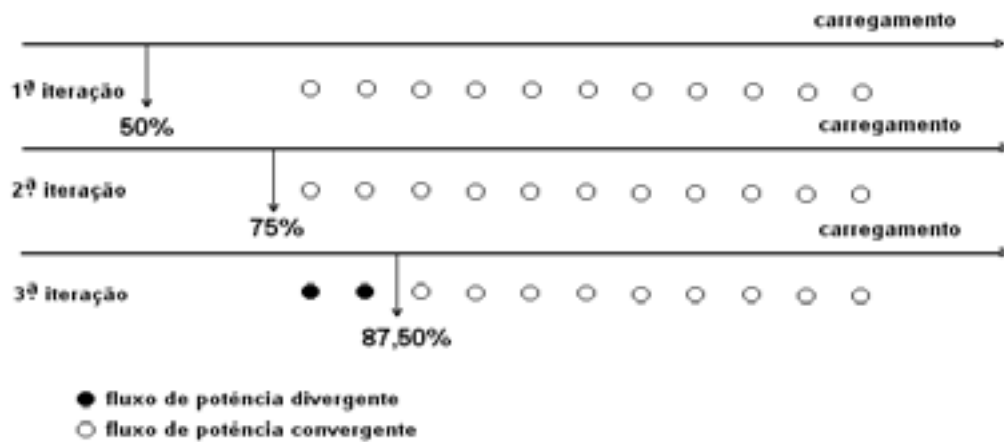


Figura 2.12 - Ilustração do "Iterative Filtering" pelo Método da Bisseção

2.1.4

Requisitos computacionais

2.1.4.1

RSI - "Reactive Suport Index "

Com relação aos requisitos computacionais, o método RSI requer a determinação da “ponta do nariz” do caso normal (potência máxima que pode ser injetada na barra), que é usada por todas as contingências e, conseqüentemente, um fluxo de carga para cada uma é requerido. Portanto, o requisito computacional total é igual a $(n + c)$ vezes o requisito computacional de um fluxo de carga simples, onde n é o número de contingências e c é o número de fluxos de carga para calcular a “ponta do nariz” do caso normal. O requisito computacional é de $\frac{n+c}{n}$ fluxos de carga para cada contingência.

2.1.4.2

IF - "Iterative Filtering" usando o Método de Correção de Newton

Para o método IF, os resultados apresentados nas Tabela 2.1 indicam um total de 863 fluxos de carga. Este exemplo inclui 10 fluxos de carga para o cálculo da “ponta do nariz” para o caso base e cálculos dos fluxos de carga com carregamentos intermediários durante a execução do algoritmo do processo, o que fornece uma taxa de 1,29 fluxos de carga por contingência.

No segundo exemplo, referente ao sistema equivalente sul-sudeste, pode-se verificar pela Tabela 2.2 que foram utilizados 22 fluxos de carga com carregamentos intermediários e 10 fluxos de carga para se obter a “ponta do nariz” (carregamento máximo) do caso base. Esses valores fornecem uma taxa de 2,9 fluxos de carga por contingência.

O IF com o Método de Correção de Newton parece ser mais apropriado para filtrar um número específico de contingências, diferente de 1, já que observa as duas últimas soluções e aplica uma "rampa" para projetar o próximo nível de carregamento, o que parece ser mais lógico quando se deseja alcançar um número predefinido de contingências.

2.1.4.3

IF - "Iterative Filtering" usando o Método da Bisseção

Da mesma forma que o IF usando o Método de Correção de Newton, o IF usando o Método da Bisseção também necessita de alguns poucos fluxos de carga para o cálculo do S_{\max} (carregamento máximo de interesse) e cálculos dos fluxos de carga para os carregamentos intermediários. A economia em termos computacionais depende da forma como os limites individuais são distribuídos no intervalo $[0, S_{\max}]$.

Pela Tabela 2.3, referente a aplicação do IF usando o Método da Bisseção ao caso exemplo de um sistema equivalente sul-sudeste do Sistema Interligado Nacional, mencionado na seção anterior, pode-se verificar que foram utilizados 33 fluxos de carga com os carregamentos intermediários e 10 fluxos de carga para se obter a “ponta do nariz” (carregamento máximo) do caso base. Esses valores fornecem uma taxa de 3,9 fluxos de carga para cada contingência. Percebe-se que o requisito computacional do IF usando o Método da Bisseção foi superior ao IF usando o Método de Correção de Newton.

IF com o Método da Bisseção, quando usado para filtrar um número específico de contingências, seleciona simplesmente um ponto intermediário a cada iteração, o que pode resultar em um alto custo computacional, dependendo dos limites de potência das contingências. Todavia, em virtude da característica de bi-seccionar sempre o último passo, esse método é designado para achar uma única contingência mais crítica de uma lista reduzida de contingências, com um baixo custo computacional.

2.2

Método utilizado pelo programa VSAT

Considerando que os autores do método da Seção 2.1.1 e 2.1.2 são engenheiros da B.C. Hydro e da Powertech Labs, pelo menos na época da publicação do artigo [4], considerando que o método da Seção 2.1.3 [7] foi incluído como comentário no artigo [4], e considerando a existência de literatura mais atual a respeito do programa VSAT [8] produzido pela Powertech Labs, é de interesse verificar o que realmente foi implementado no programa.

O VSAT (Voltage Security Assessment Tool) é uma ferramenta para Avaliação da Estabilidade de Tensão dos Sistemas de Potência. O VSAT determina a segurança de tensão de um estado determinado do sistema como também o limite de segurança de qualquer número de transferências de potência. É projetado para uso de planejadores e operadores do sistema nos ambientes off-line ou on-line (conectado a um centro EMS) [2].

2.2.1

Técnica computacional principal

A técnica computacional principal para a Avaliação da Segurança de tensão no VSAT é a solução completa do Fluxo de Potência AC com método Desacoplado Rápido (FDPF). A estabilidade de tensão do sistema de potência é indicada pela existência da solução do fluxo de potência considerando as capacidades de var dos geradores, ações e limites dos dispositivos de controle, modelos de carga etc, representadas corretamente. Com a redução de passo automática, o FDFP é capaz de alcançar o nariz da curva PV sem dificuldades numéricas. Ao contrário de algumas outras ferramentas que calculam uma curva PV pós-contingência pelo incremento de carga/geração depois que a contingência é aplicada no ponto base (usando o Fluxo de Potência Continuado ou métodos convencionais), o VSAT traça a curva PV pré-contingência (considerando apropriadamente ações de controle manuais e automáticas) e então aplica as contingências em cada ponto para determinar se esse ponto é seguro ou não [2].

2.2.2

Módulo de "Contingency Screening" [8]

"Contingency Screening" é um módulo da ferramenta VSAT que tem como função a seleção automática de contingências. Esse módulo efetua sua função básica em 2 partes:

- (1) De todas as contingências possíveis, um certo número delas é selecionado e ordenadas por ordem de severidade por um método que será descrito na Seção 2.2.2.1.
- (2) As contingências selecionadas na etapa (1) são filtradas e reclassificadas pelo método descrito na Seção 2.2.2.2.

A filtragem da etapa (2) tem como objetivo reduzir o conjunto de contingências selecionadas na etapa (1) a um número específico predeterminado pelo usuário. A etapa (2) só é executada se esse número for menor do que o número de contingências selecionadas na etapa (1).

2.2.2.1

Índice de severidade para classificação de contingências [8]

Esse índice é utilizado na primeira etapa de seleção e ordenação de contingências efetuada pelo módulo de "Contingency Screening" do VSAT, que será descrito em detalhes.

Uma grande lista de contingências é submetida ao módulo "Contingency Screening" que reduzirá esta lista a uma quantidade de contingências realmente capaz de levar o sistema à instabilidade de tensão.

O processo de classificação por ordem de severidade segue os seguintes passos:

1. Resolver o fluxo de potência para o caso base;
2. Estressar o caso base aumentando a carga da(s) barra(s) em estudo e aumentando a geração de barras predeterminadas;

3. Calcular o limite de transferência de potência para o caso base estressado (conforme etapa 2);
4. Nesse limite de transferência de potência calculado na etapa 3, aplicar todas as contingências;
5. Selecionar os casos das contingências que não convergiram;
6. Ordenar as contingências selecionadas de acordo com o número de iterações de cada caso. Quanto menor o número de iterações resultante do fluxo de potência não convergente do caso da contingência, maior a severidade da contingência. Esse critério será explicado mais adiante.
7. Selecionar as contingências que convergiram;
8. Ordenar as contingências selecionadas de acordo com o critério da Tabela 2.4:

Tabela 2.4 - Critério de classificação por ordem de severidade das contingências convergentes.

Ordem Decrescente	Critério de Classificação de Contingência por Ordem de Severidade
1	violação de critérios de tensão
2	violação de critérios de reserva de potência
3	violação de margem de potência
4	maior mismatch
5	menor mismatch

Por esse processo de classificação pode-se afirmar que a contingência mais severa será aquela que causar divergência de fluxo de potência com o menor número de iterações e a menos severa será aquela que o fluxo de potência convergir com o menor somatório de todos os "mismatches" de potência ativa a reativa.

A Figura 2.13 mostra por que o critério do número de iterações para alcançar a divergência pode ser usado para classificar uma contingência por ordem de severidade. As contingências são ordenadas por sua severidade avaliando-as através de um dado carregamento, que no VSAT é aquele calculado como limite de transferência de potência, ou seja, o nível de carregamento de modo que ainda se tenha uma margem M até o ponto de máxima transferência de

potência. Portanto, para a contingência cujo o fluxo de carga divergir com menos iterações, este carregamento é mais próximo do ponto de colapso.

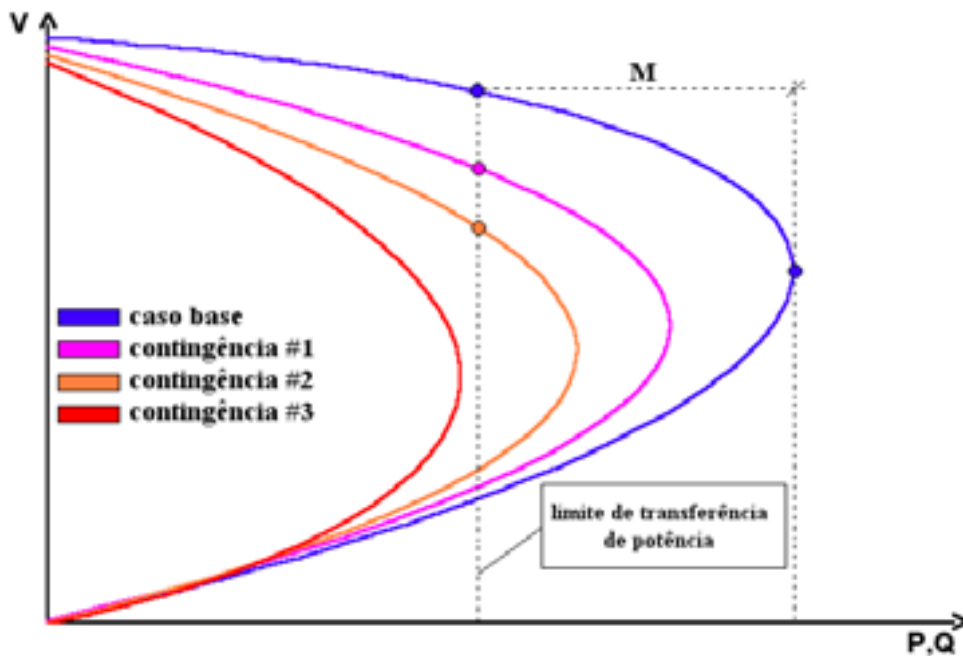


Figura 2.13 – Ordenação pelo número de iterações de casos de contingências divergentes aplicadas ao caso base

Na Figura 2.13 a curva azul representa a curva $V \times P, Q$ para o caso base e as curvas lilás, laranja e vermelha representam as curvas $V \times P, Q$ s após a aplicação das respectivas contingências. Pelas curvas, supondo-se que para as dos casos contingências os fluxos de potência divergiram, pode-se afirmar que a ordem de severidade é 3, 2 e 1.

As contingências que convergiram durante o fluxo de potência, e que não violaram os critérios de instabilidade de tensão considerados pelo VSAT, são abandonadas. Apenas são selecionadas as contingências que de alguma forma afetam o sistema. As contingências selecionadas são analisadas visando a segurança de tensão.

2.2.2.2

IF - "Iterative Filtering" [7,8]

Uma vez selecionadas e classificadas as contingências por ordem de severidade, conforme descrito na Seção anterior, o usuário do VSAT pode decidir reduzir a lista de contingências a um número específico de contingências que afetam o sistema. Essa etapa só é realizada se o usuário do VSAT definir um número específico de contingências inferior ao número de contingências já selecionadas e classificadas na etapa anterior. O Filtro Iterativo ratifica a classificação ou retifica um possível erro de classificação cometido na etapa anterior.

Essa filtragem e reclassificação das contingências consiste em realizar uma filtragem iterativa que no caso do VSAT, utiliza um processo matemático muito conhecido chamado "Simultaneous Binary Search" ou Método da Bisseção, já descrito na Seção 2.1.3

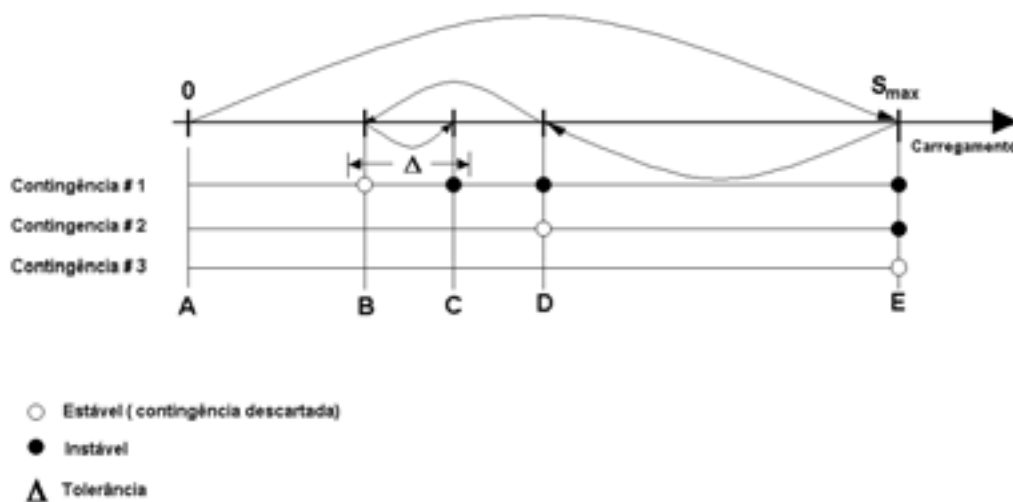


Figura 2.14 – "Iterative Filtering" pelo Método da Bisseção utilizado pelo VSAT

O nível de carregamento no qual a contingência é descartada fornece um valor que é considerado como um índice de severidade da contingência ou do conjunto de contingências. Esse índice, denominado na Seção 2.1.3 por limite mínimo pessimista, indica que a contingência é mais severa quanto menor é o carregamento no qual esta contingência foi descartada. Isso pode ser observado

pela ilustração do processo na Figura 2.14. A Tabela 2.5, mostra a lista resultante do processo, ordenada por grau de severidade decrescente, onde $E > D > B$:

Tabela 2.5 – Lista resultante do "Iterative Filtering" utilizando o Método da Bissecção ilustrado na Figura 2.14

Ordem	Contingência	Índice de Severidade
1	Contingência #1	Carregamento B
2	Contingência #2	Carregamento D
3	Contingência #3	Carregamento E

Desta forma, pode-se observar pela Tabela 2.5 que B é o menor nível de carregamento, o que indica ser a contingência #1 a mais severa do conjunto. Por outro lado, a contingência #3 é a menos severa, tendo em vista que E é o maior nível de carregamento constatado no processo, onde a contingência #3 foi descartada.

