

Curva QV E Índice HHI Para Análise de Colapso de Tensão e Monopólio de Potência Reativa

Vanessa Bonfim Lugon, A .C. Zambroni de Souza, Fritz Walter Mohn, Thiago F. Carvalho

Resumo- Este documento tem por objetivo apresentar as atividades desenvolvidas durante os doze meses do contrato de Pesquisa e Desenvolvimento concordado entre UNIFEI/FUPAI e ESCELSA. Desta forma, aspectos teóricos a respeito de estudo de estabilidade de tensão aplicando análise da curva QV e o índice HHI são discutidos. Depois deste aprofundamento foi elaborado um programa computacional onde as duas metodologias puderam ser confrontadas, então, os resultados foram avaliados e comentados. Para validar a metodologia proposta os testes foram realizados com ajuda de sistemas da Escelsa representados no PAR (Plano de Ampliações e Reforços – ONS), com bons resultados obtidos.

Palavras-chave— ações de controle, controle coordenado de tensão, sistemas de potência.

I. INTRODUÇÃO

O projeto 0380-005/2006 - Curva QV e Índice HHI para análise de colapso de tensão e monopólio de potência reativa, foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL, no ciclo 2005/2006. Este trabalho foi executado pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) sendo apoiado financeiramente pela Espírito Santo Centrais Elétricas (ESCELSA).

Nos últimos anos, as empresas concessionárias de energia elétrica em conjunto com profissionais acadêmicos têm investido em ferramentas que propiciam análises que levam em consideração o fluxo reativo de potência. Nesta direção, a teoria de estabilidade de tensão, precisamente as ferramentas estáticas de análise de sistemas elétricos, além de fornecer conhecimentos a respeito do equilíbrio do ponto de operação, também agrega outras informações qualitativas e quantitativas, que auxiliam os analistas a operar e planejar o sistema elétrico com mais propriedade.

O método da curva QV foi desenvolvido a partir de dificuldades na convergência de programas de fluxo de potência. Estas dificuldades surgem quando são simulados casos onde o carregamento de linhas e transformadores está próximo

mo ao limite máximo permitido. A convergência para estes casos era obtida quando a tensão na barra mais crítica do sistema era fixada e os limites de reativo para esta barra eram considerados infinitos, tornando-a uma barra do tipo PV. Para se obter a curva QV na barra crítica [VIII], bastava fixar a tensão nesta barra, processar o programa e anotar o valor de potência reativa gerada ou absorvida [VIII].

Atualmente problemas relacionados à instabilidade de tensão em sistemas de potência são uma das principais preocupações no planejamento e operação de diversos sistemas elétricos em todo o mundo [VIII, VIII]. Uma das causas para o crescente interesse pelo tema tem sido o aumento de carga sem um correspondente incremento da capacidade de transmissão. Pressões de ordem econômica e até mesmo de ordem ambiental estão levando muitos sistemas a operarem próximo ao limite de estabilidade de tensão. Outro problema inerente aos sistemas atuais é o surgimento de fontes de geração de energia por toda a parte, estimuladas pelos programas de incentivo do governo federal, na tentativa de dissipar o fantasma do apagão. Logo após a ocorrência do racionamento, houve uma retração de mercado que possibilitou uma folga momentânea para todo o sistema nacional em termos de investimentos, mas com a retomada do crescimento, o sistema voltou a operar em condições estressantes. Outro fato que não pode ser desprezado e que a legislação do setor elétrico esta atuando como um elemento complicador diante de um universo de regras, contratos e definições intermináveis.

Nos Estados Unidos a Western System Coordinating Council (WSCC), bem como a Bonneville Power Administration (BPA) têm utilizado muito a técnica da curva QV para tratar as ocorrências relacionadas a colapso de tensão no Sistema Elétrico Americano. Neste Sistema as linhas de transmissão operam com temperaturas bem mais elevadas quando comparadas com as linhas em território Brasileiro. As linhas de transmissão de energia no Brasil geralmente operam com temperaturas de 50°, 60°, 75°C ou no máximo 90°C, enquanto que as linhas nos EUA chegam a 150°C em condições normais de operação. Por causa disto os Americanos têm que investir maciçamente em equipamentos que monitoram corrente, tensão, velocidade do vento e temperatura destas linhas. Investem também em programas de manutenção preventiva controlando as condições das juntas e emendas dos condutores através da observação de radiografias e análise dos pontos quentes com aparelhos termovisores. Um sistema com estas condições operativas estará mais susceptível a ocorrência de eventos que culminem em colapso de tensão.

A curva QV está relacionada com o a avaliação de controle de potência reativa de uma barra específica. Este controle e o suprimento de potência reativa desempenham papel mui-

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do V Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (V CITENEL), realizado em Belém/PA, no período de 22 a 24 de junho de 2009

V.B. Lugon é Engenheira de Planejamento de Redes AT da Espírito Santo Centrais Elétricas (e-mail: vanessal@enbr.com.br).

A. C. Zambroni de Souza é professor titular da Universidade Federal de Itajubá (e-mail: zambroni.@unifei.edu.br).

to relevante na análise de colapso de tensão. Tornou-se também particularmente importante nos últimos anos em função da desregulamentação do setor elétrico. Por esta razão, além da questão técnica do controle de tensão e potência reativa, a questão mercadológica associada a monopólio de potência deve ser analisada. Neste artigo, tal análise é desenvolvida através do índice HHI [VIII]. Empregado inicialmente para determinação de monopólio de bens, este índice foi mais tarde adaptado para análise de monopólio de potência ativa, sendo somente recentemente adaptado para estudos de mercado de potência reativa.

Este artigo é organizado como segue: a Seção II apresenta os fundamentos da curva QV, enquanto a Seção III discute o índice HHI. A seção IV mostra a metodologia e a Seção V apresenta os resultados obtidos.

II. ASPECTOS DA CURVA QV

O método da curva QV oferece uma visualização razoável da performance do sistema elétrico durante eventos que poderão comprometer a estabilidade deste, mostrando ainda as possíveis localizações das reservas de potência reativa que atuam como ações de controle evitando que o sistema direcione ao colapso. Atualmente alguns programas de fluxo de potência já trazem o cálculo da curva QV embutido em seu algoritmo, o ANAREDE é um exemplo.

A figura 1 mostra as características da curva QV.

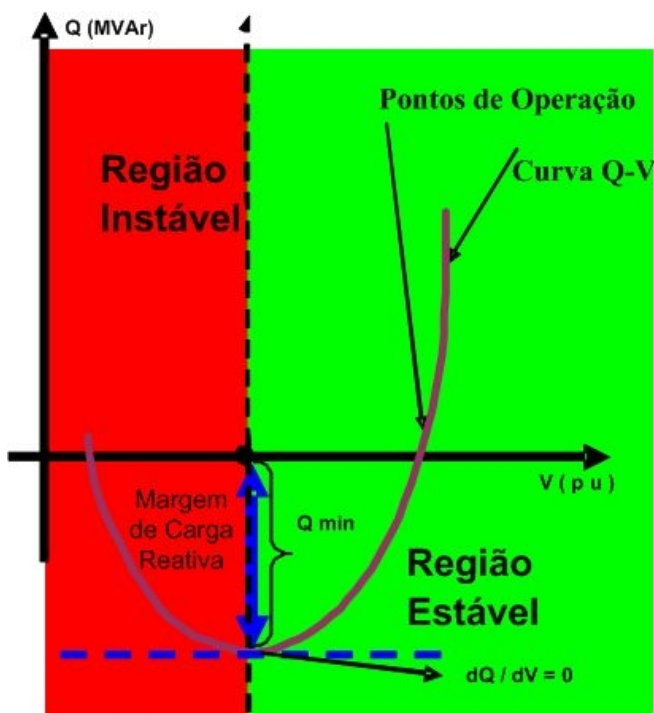


Figura 1. Curva característica da relação QV.

A figura 1 mostra a fronteira de estabilidade de tensão no ponto onde a variação da potência reativa com relação à tensão se torna zero, isto é, a derivada dQ/dV é zero. Este ponto também define a potência reativa mínima requerida para manter o ponto de operação estável. Um acréscimo da potência reativa Q resulta também num aumento da tensão du-

rante as condições normais de operação. Desta forma, se o ponto de operação estiver do lado direito da curva QV (cor verde na figura 1), o sistema é dito estável e os casos processados convergentes. Por outro lado, pontos de operação que se encontram na parte esquerda da curva (cor vermelha na figura 1) conduzem o sistema à instabilidade, o que leva os casos de fluxo de potência a uma difícil convergência e às vezes inclusive à não convergência.

A Margem de Carga Reativa de uma determinada barra é definida como a distância do ponto mínimo de sua curva QV ao eixo das abscissas (eixo das tensões), Q_{min} na figura 1. Uma característica importante da Margem de Carga Reativa é que à medida que nos aproximamos do ponto de colapso todas as barras do sistema apresentam uma diminuição em sua Margem de Carga Reativa, tal como mostrada na figura 2, evolução da curva QV no método da continuação, ou seja, na evolução da curva PV.

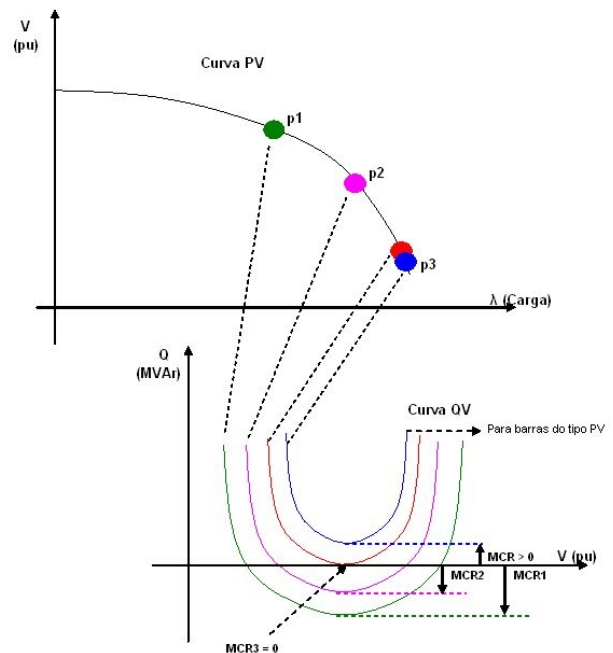


Figura 2. Relação da curva PV e das curvas QV.

Desta forma, como pode ser observada na figura 2, à medida que os pontos $p1$, $p2$ e $p3$ tendem ao colapso, as margens de carga reativa vão diminuindo, até se tornarem nulas. Isso é válido para algumas barras do tipo PV (cor azul na figura 2), já que estas margens se tornam positivas, mostrando que para esses níveis de carregamento do sistema, esta barra deve suprir essa quantidade de potência reativa para manter os níveis de tensões especificados nos casos de fluxo de potência.

O método da CURVA QV é utilizado para dimensionar as ações de controle de despacho de potência reativa por oferecer as seguintes VANTAGENS [VIII]:

- A convergência dos casos normalmente não representa problema, mesmo a solução estando do lado instável da curva.
- A automatização utilizando uma rotina de programação faz com que o método se torne rápido, pois para pequenas variações na escala de tensão a convergência leva algumas iterações apenas.
- A necessidade de compensação reativa na barra analisada é dada de imediato pelo valor de reativo gerado pelo sín-

crono. Com a análise de um grupo de barras, pode-se planejar o melhor local para se instalar um síncrono ou um banco de capacitores shunt.

d) A inclinação da curva indica o quanto à barra em análise é sensível às alterações de tensão.

e) As curvas QV traçadas para diversas barras podem ser sobrepostas em um mesmo gráfico. No ponto mínimo de cada curva as fontes de potência reativa estão operando próximo ao limite de geração. Sendo assim, neste ponto temos toda a reserva de reativo disponível no ponto crítico.

f) A última vantagem, adicionada por este trabalho, é analisar o sistema através do comportamento da margem reativa, observando o ganho de margem quando da expansão do sistema elétrico. Esta ótica é extremamente importante, o fato de agregar obras em um sistema elétrico não significa que são suficientes para afastar o perigo do colapso de tensão.

O valor do reativo no ponto mínimo da curva representa tudo o que o sistema, naquele ponto, pode oferecer para manter a estabilidade de tensão.

Estabilidade de tensão e potência reativa estão intimamente relacionadas. Uma vez traçada a curva QV o seu ponto de mínimo representa a margem de reativo daquela barra.

As margens de potência reativa das barras atuam no sistema como se fossem válvulas reguladoras, umas injetando mais potência reativa e do que outras, de tal forma a manter o equilíbrio do sistema (estabilidade). No colapso as fontes de injeção de potência reativa se esgotam.

Em relação à metodologia empregada, dois pontos importantes podem ser enfatizados:

1- Testes de técnicas desacopladas de convergência, que tendem a tornar a convergência mais rápida.

2- Incorporação de critérios de parada. O objetivo é, após a obtenção do ponto de mínimo, parar a execução do programa, uma vez que as informações relevantes já terão sido obtidas. Para tanto, é necessário que se identifique este ponto de maneira efetiva, o que será feito através de duas metodologias propostas pela equipe envolvida. Testes preliminares apresentaram excelentes resultados.

É importante ressaltar que os tópicos listados acima são inovadores, de forma que constituem um avanço na área de pesquisa relacionada. Em particular, estes tópicos foram empregados com sucesso pela equipe da UNIFEI em estudos do método da continuação [VIII, VIII] quando aplicados em estudos das Curvas PV e QV. Neste aspecto, técnicas de desacoplamento do conjunto de equações foram empregadas. Assim, algumas técnicas foram exaustivamente estudadas, culminando com o trabalho. A partir do estudo de fluxo de carga desacoplado, passou-se a estudar o método da continuação desacoplado, conforme divulgado em [VIII- VIII]. A partir do conhecimento adquirido com os itens anteriores, a equipe da UNIFEI trabalhou no desacoplamento de equações para o método da continuação aplicado à curva PV, o que já era foco de alguns trabalhos na literatura, e também para a curva QV, inovando em uma importante área de concentração.

É notório enfatizar que os critérios de parada abordados no parágrafo anterior estão diretamente relacionados com o estabelecimento de índices de colapso de tensão. Neste projeto, os critérios propostos em [VIII] são empregados e modificados para emprego na Curva QV.

A descrição acima está diretamente relacionada com a robustez do programa computacional desenvolvido, já que o mesmo deve ser capaz de executar casos do sistema elétrico brasileiro. Como o tema proposto foi objeto recente de publicação científica por parte da equipe da UNIFEI, a integração da abordagem bibliográfica com o tema está de acordo com o requerido por um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento, já que vários aspectos teóricos importantes serão endereçados ao longo do desenvolvimento do projeto.

A. Obtenção da curva QV.

A metodologia convencional para levantar a curva QV de uma determinada barra, e conseqüentemente determinar a margem de carga reativa é de acordo com o seguinte algoritmo:

1) Ajustar o sistema num caso de fluxo de potência nas condições de operação de interesse.

2) Escolher a barra que se deseja calcular a margem de carga reativa.

3) Introduzir nesta barra um gerador síncrono fictício com os seus limites abertos, ou simplesmente transformá-la em barra do tipo PV.

4) Variar a tensão de saída no gerador síncrono em pequenos passos (usualmente 0.01 pu ou menos).

5) Resolver o caso de fluxo de potência.

6) Guardar a tensão da barra monitorada (V) e a potência reativa fornecida pelo compensador síncrono fictício(Q).

7) Repetir os passos 4 a 6 até que pontos suficientes tenham sido obtidos.

8) Traçar com os pontos obtidos a curva QV e verificar a margem de carga reativa obtida.

Esta metodologia apresenta os seguintes inconvenientes:

a) Reduzir a tensão, item 4, em passos constantes onera o custo computacional.

b) O único critério de parada possível é monitorar a subida da curva QV. Acontece que nesta região a instabilidade numérica pode ser tão grande que poderá comprometer a convergência do fluxo de potência. Novamente aumentando o custo computacional.

Então, foi desenvolvida uma metodologia análoga ao método da continuação para levantamento da curva PV, com critérios de parada, como mostrado a seguir.

B. Método continuado QV.

O termo “Continuado QV” é uma maneira abreviada de descrever: “Método da Continuação para Calcular a Curva QV”.

O método utiliza técnicas matemáticas que racionalizam as etapas, de forma a melhorar o desempenho dos cálculos computacionais. É muito semelhante ao Método da Continuação para cálculo da curva PV, difundido na literatura.

O continuado QV avança de maneira controlada, com passos variados de tensão, acelerando ou diminuindo a velocidade de processamento conforme a sensibilidade do Jacobiano, até atingir o ponto de mínimo.

A seguir é explicada de maneira abreviada a proposta do continuado QV, que pode ser aplicado adotando qualquer

metodologia de convergência das equações de fluxo de potência.

Basicamente o método consiste, a partir de um ponto de equilíbrio, determinar o tamanho do passo da tensão e corrigir as tensões das outras barras para facilitar o processo de convergência.

C. Tamanho do Passo

O tamanho do passo da tensão é dado por:

$$\lambda = \frac{k}{\|V_Q\|} \quad (1)$$

Onde:

- k é constante que acelera ou diminui o tamanho do passo.
- $\|\cdot\|$ é a norma euclidiana do vetor V_Q .

Por sua vez, V_Q seria dado por:

$$V_Q = J^{-1}Q_1 \quad (2)$$

Onde:

- J é o Jacobiano do fluxo de carga, considerando a barra que está sendo traçada a curva QV como do tipo PQ. Essa alteração é para determinar o índice de parada, que será explicado mais na frente.
- Q_1 é um vetor esparsa formado com zeros em todas as posições, exceto na posição correspondente à carga reativa da barra considerada, que assume um valor unitário, ou seja:

$$Q_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ \cdot \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Por sua vez, as correções das tensões nas barras PQ são dadas por:

$$\Delta V = k * \frac{V_Q}{\|V_Q\|} \quad (4)$$

Ressalta-se que, no processo iterativo de convergência, a barra em que está sendo traçada a curva QV é considerada como PV. Entretanto, para se calcular o passo e as correções das tensões, a mesma é considerada como PQ. A razão para este procedimento é que desta forma o índice de parada (IQ) torna-se nulo no ponto de inflexão da curva QV [6]. O esforço computacional neste caso não é considerável, e esta transformação é feita após a convergência do conjunto de equações de fluxo de potência.

Observe que nesta metodologia o tamanho do passo da tensão onde a curva QV está sendo traçada é variável e

sensível ao Jacobiano. Desta forma, quando o ponto de equilíbrio estiver distante do ponto de mínimo da curva QV os passos serão maiores, e menores quando estiver próximo ao ponto de inflexão.

D. Critérios de parada.

Na metodologia do Continuado QV são adotados dois critérios de parada, lembrando que a adoção de critérios de parada parte da suposição que se deseja traçar apenas a parte estável da curva QV. Estes critérios são:

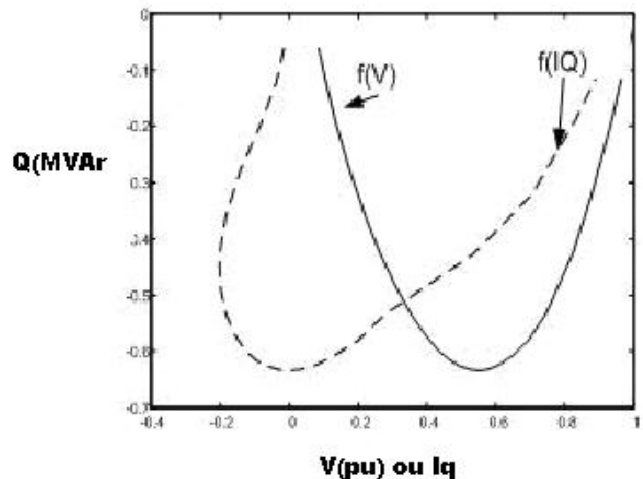
1. Monitorar a potência reativa gerada (QG), calculada para a curva QV. Quando o seu módulo diminuir, penetrando dentro de certa região, significa que o ponto de mínimo foi obtido.

2. Monitorar o índice IQ. Este índice tende à zero no ponto de mínimo da curva QV [9]. IQ é um indicador que aponta com precisão a proximidade do mínimo da curva QV, servindo como um critério de interrupção do cálculo dos pontos da curva. Isso é interessante, porque na proposta de continuado da curva QV, os passos são menores à medida que a referida curva se aproxima do ponto de mínimo. Outra vantagem reside no fato de avaliar a situação quando houver divergência das equações de fluxo de potência. Em outras palavras, as equações de fluxo de potência divergem, e o critério "1" nunca será alcançado, mas ao analisar o índice IQ do último ponto convergido, conclui-se que este pode ser considerado como de inflexão.

O índice I_Q é dado por:

$$I_Q = V_Q^T J V_Q \quad (5)$$

A figura 3 mostra o comportamento da curva QV e do índice I_Q . Ressalta-se que I_Q é nulo no ponto de mínimo da curva QV. Como I_Q tende a zero, se o processamento for interrompido conforme um valor pré-estabelecido, por exemplo, I_Q menor do que 0,01, não haverá perdas significativas no cálculo da potência reativa gerada. Entretanto, fluxos de potência não deverão ser processados numa região onde a probabilidade de instabilidade numérica é grande. Logo, evitar este processamento é um benefício computacional bastante interessante.



III. ÍNDICES DE CONCENTRAÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA

Esta seção foca na questão do mercado de potência reativa. Desta forma, será mostrado, de maneira particular, o índice escolhido de análise, apresentando antes, uma breve justificativa. É importante enfatizar que a questão de estudo de mercado de potência reativa insere-se em um contexto recente de desverticalização de mercado de energia elétrica. Neste contexto, a questão do modelo de precificação e simulação de mercado desempenham papel crucial. Neste trabalho, todavia, focar-se-á na questão particular de mercado de potência reativa, subproduto deste novo cenário, e suas implicações.

IV. CALCULANDO O HHI

O índice HHI (do inglês “Herfindahl-Hirschman Index”) é definido como [VIII]:

$$HHI = \sum_{i=1}^N S_i^2 \quad (5)$$

Onde N é o número de participantes e S_i é o percentual de participação de cada agente. Um valor de HHI próximo de 10.000 é indicação de que todo o mercado de potência reativa está nas mãos de um único agente fornecedor. Valores de HHI abaixo de 1.800 geralmente considerados valores que caracterizam ausência de monopólio/mercado de potência reativa.

Um ponto importante refere-se à discussão deste índice, uma vez que o mesmo foi proposto em sistemas de potência, inicialmente para avaliação de monopólio de potência ativa, sendo então proposto para análise de potência reativa. Neste aspecto, o índice isoladamente pode não representar muita coisa, sobretudo devido ao desconhecimento físico do mesmo pela maioria dos engenheiros. Todavia, dois fatores importantes devem ser considerados:

- a) Mudanças neste índice podem ser um indicador de alterações abruptas no fornecimento de potência reativa.
- b) A junção desta análise com o cálculo da curva QV pode iluminar discussões importantes a respeito da natureza local de controle de potência reativa.

Note que a capacidade relativa de um gerador de participar no fornecimento de regulação de tensão em uma barra, depende da influência deste gerador na barra a se controlar e na disponibilidade de potência reativa deste gerador. Este tipo de influência e capacidade pode ser medida através da matriz Jacobiana de fluxo de carga, avaliada para uma condição operativa conhecida.

Assim como requerido para a potência ativa, a potência reativa em um sistema de potência deve ser balanceada todo o tempo, sob pena de não se controlar o perfil de tensão. Neste trabalho, o Jacobiano de fluxo de carga leva em consideração todas as equações de potência ativa e reativa de to-

das as barras (incluindo as barras de tensão controlada), excluindo-se somente as equações associadas à Barra Swing.

Considere o Jacobiano de fluxo de carga de acordo com estas regras. A capacidade individual de cada gerador de gerar potência reativa afeta diretamente o controle de tensão do sistema. Assim, o coeficiente S_i considera a capacidade relativa de cada gerador além do impacto deste gerador no controle de um determinado nível de tensão em uma barra do sistema.

Considerações

Por ocasião do cálculo de HHI, duas suposições podem ser feitas:

1- A capacidade de cada gerador é dada pela faixa total de potência reativa $Q^{range} = Q^{max} - Q^{min}$. Esta metodologia, equivocada por considerar uma margem que os geradores efetivamente não têm, é comumente empregada na literatura.

2- A capacidade de cada gerador é dada pela diferença entre o valor gerado em cada ponto operativo e a sua capacidade máxima de geração $Q^{margin} = Q^{max} - Q^{actual}$. O segundo critério considera a margem real disponível em cada gerador. Considerando a primeira opção, obtém-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = (J^{-1} e_i^Q) Q_i^{range} \quad (6)$$

onde Q_i^{range} é a faixa total de potência reativa de cada gerador m, e e_i^Q é um vetor com componentes iguais a zero, com exceção da posição i, que tem elemento igual a 1. Depois de calcular ΔV_i para todos os participantes i em relação aos geradores m, S_i é calculado de acordo com:

$$S_i = 100 * \frac{\Delta V_i}{\sum_{k=1}^n \Delta V_k} \quad (7)$$

Finalmente o índice HHI é calculado através da equação (5). Na medida em que o número de geradores participantes cresce, o valor de HHI deve diminuir. Todavia, como dito acima, ao invés da faixa total de potência reativa, pode-se usar a faixa efetiva de geração de potência reativa. Neste caso, basta substituir Q_i^{range} por Q_i^{margin} na equação (6). O efeito prático desta ação é um aumento no valor de HHI, visto que isso é equivalente a reduzir a capacidade de cada agente, se comparado com a primeira formulação.

V. METODOLOGIA

A idéia proposta consiste em analisar o sistema ESCELSA sob diferentes condições operativas, anos: 2008, 2009 e 2010 (PAR ciclo 2007). Desta forma, analisar-se-á o sistema para os casos bases, de forma a quantificar a reserva de potência reativa do sistema, identificação de barras críticas e

monopólio de potência reativa.

Os resultados além de analisar isoladamente para cada ano o comportamento do sistema da ESCELSA sob o ponto de vista de estabilidade de tensão, estudo da margem reativa, e o monopólio de tensão, índice HHI, será verificado se existe uma correlação entre as duas metodologias.

Para tanto foi desenvolvido um programa computacional agregando os dois conceitos, curva QV e índice HHI.

Este programa computacional foi elaborado com interface gráfica e diversos arquivos de saídas, as principais características são:

- Leitura dos dados em formato ANAREDE.
- Cálculo da margem de carga reativa de algumas barras escolhidas, com possibilidade de selecionar todas as barras.
- Opção do método convencional e continuado QV na metodologia de cálculo da margem reativa.
- Cálculo do vetor tangente para o caso base, demonstrando quais as barras mais sensíveis à variações de amplitude e ângulo da tensão.
- Gráfico da curva QV com as opções de traçar toda a curva ou apenas a parte estável, com adoção de critérios de parada.
- Cálculo do índice HHI de algumas barras selecionadas, com possibilidade de cálculo para todas as barras.
- Configuração do computador: qualquer computador a partir de 1GB de memória RAM e 40 GB de HD.

Durante o desenvolvimento do programa os testes foram realizados em sistema acadêmicos. Em uma fase posterior foi testado para sistemas reais. Já na fase de testes os resultados mostraram que a ferramenta robusta para análise de reativos, principalmente em relação à estabilidade de tensão.

VI. TESTES E RESULTADOS

O programa desenvolvido calculou as margens reativas de cada barra da Escelsa, para as seguintes condições:

- Caso PAR equivalentado, ano 2008.
- Caso PAR equivalentado, ano 2009.
- Caso PAR equivalentado, ano 2010.

Os resultados foram tabulados nas Tabelas I e II. A Tabela I mostra apenas algumas barras representadas no PAR, entretanto, todas as barras foram processadas. A Tabela II mostra o somatório das margens de cargas reativas considerando todas as barras do sistema da Escelsa. O somatório das margens reativas das barras é uma maneira de verificar o ganho do sistema com relação a sua expansão.

Na tabela I as células em vermelho chamam atenção quando ocorrer uma diminuição de 15 % de ano para o ano seguinte.

Comentários das Tabelas I e II:

1. Uma região irá apresentar problemas de instabilidade de tensão quando a margem reativa estiver próxima de zero. Não ocorreu esta situação.

2. A diminuição da margem reativa de um ano para o seguinte é natural, haja vista que o mercado cresce e o sistema elétrico muitas vezes não.

3. A queda brusca da margem reativa de uma barra pode ser provocada por mudanças na topologia da rede elétrica.

4. Considerando o item anterior, então, verificar se o somatório das margens está diminuindo significa que o sistema estará estressando. Como o aumento do somatório das barras sempre foi crescente, em módulo, significa que o sistema está sendo bem dimensionado.

5. As diminuições da margem reativa superior a 15%, na relação 2009/2008, nas barras 91, 95, 2620 e 2624 não representa problema, pois, a próxima relação, 2010/2009 recupera o ganho das margens reativas. Apenas a barra 2607 manteve uma queda acentuada, no entanto, também não é preocupante, pois o valor absoluto é confortável, muito longe de zero, e a barra de alta tensão do transformador, barra 2606, apresentou ganho de margem reativa.

6. Os resultados das Tabelas I e II mostram que a expansão do sistema da ESCELSA está contemplando a segurança do sistema com relação à estabilidade de tensão. Isto é, uma análise considerando apenas o perfil de tensão das barras utilizando fluxo de potência convencional não é suficiente para que o planejador tenha certeza de futuros problemas de estabilidade.

Tabela I – Resultados da margem reativa de algumas barras da ESCELSA representadas no PAR

BARRA	MARGEM REATIVA			RELAÇÕES DAS MARGENS REATIVAS	
	2008	2009	2010	2009/2008	2010/2009
Num	MVAR	MVAR	MVAR	%	%
91	-201,99	-137,32	-153,51	67,98	111,79
95	-201,99	-137,32	-153,51	67,98	111,79
96		-132,71	-148,03		111,54
2601	-77,55	-75,08	-77,35	96,81	103,02
2602	-32,72	-36,88	-37,32	112,71	101,19
2603	-48,50	-45,93	-47,61	94,70	103,66
2604	-199,17	-199,34	-596,35	100,09	299,16
2605	-207,37	-208,71	-751,99	100,65	360,30
2606	-282,07	-302,33	-410,08	107,18	135,64
2607	-79,98	-71,84	-55,15	89,82	76,77
2608	-606,54	-617,99	-1310,64	101,89	212,08
2609	-637,47	-561,64	-1150,40	88,10	204,83
2610	-102,77	-91,39	-94,39	88,93	103,28
2611	-53,50	-54,36	-56,33	101,61	103,62
2612	-207,27	-208,59	-772,60	100,64	370,39
2613	-379,69	-376,05	-510,18	99,04	135,67

2614	-208,74	-286,59	-314,95	137,30	109,90
2615	-73,61	-104,47	-100,92	141,92	96,60
2616	-67,31	-67,18	-66,22	99,81	98,57
2617	-45,39	-45,04	-44,51	99,23	98,82
2618	-606,70	-618,01	-1309,31	101,86	211,86
2619	-602,82	-610,49	-1185,35	101,27	194,16
2620	-789,25	-592,84	-2019,00	75,11	340,56
2621	-77,50	-71,32	-75,55	92,03	105,93
2622	-593,95	-552,58	-1019,86	93,03	184,56
2624	-643,19	-508,35	-1134,55	79,04	223,18
2625	-298,20	-266,34	-355,79	89,32	133,58

2614	947,33	471,47	1116,94
2615	912,75	476,06	1065,75
2616	912,62	461,28	1046,09
2617	910,35	461,84	1043,13
2618	1217,50	483,74	2037,96
2619	1216,83	483,53	2025,10
2620	1503,30	527,54	3241,06
2621	1426,21	510,05	3023,50
2622	1256,27	490,83	2197,00
2624	1496,19	531,08	3211,60
2625	1532,66	530,15	3367,90

Tabela II – Resultados do somatório de todas as barras da ESCELSA

	MARGEM REATIVA			RELAÇÕES DAS MARGENS REATIVAS	
	2008	2009	2010	2009/2008	2010/2009
	MVAR	MVAR	MVAR	%	%
Total	-21.050,68	-24.500,87	-43.718,71	116,39	178,44

Em relação aos resultados de monopólio de potência reativa, a Tabela III resume os resumos obtidos para as condições operativas consideradas para a Tabela I. Na tabela III a variável HHI é adimensional e mede o valor de monopólio de potência reativa medido para cada barra mostrada na primeira coluna.

Tabela III – Resultados para concentração de mercado de algumas barras da ESCELSA representadas no PAR

BARRA	HHI		
	2008	2009	2010
Nº			
91	1217,50	483,74	2037,96
95	1217,50	483,74	2037,96
96	-	483,76	2038,16
2603	1420,47	509,1	3006,62
2604	1177,99	700,03	2707,02
2605	1177,99	700,03	2707,02
2606	1314,02	943,23	1893,86
2607	1264,59	817,96	1893,86
2608	1217,50	483,74	2037,96
2609	1310,78	498,42	2406,24
2610	1310,78	483,87	2164,79
2611	1208,86	498,42	2406,24
2612	1177,83	699,97	2717,16
2613	1197,91	478,90	1986,71

Os resultados das Tabelas I e III mostram que, de fato, as análises de estabilidade de tensão e monopólio de potência reativa devem ser executadas separadamente, de forma a identificar corretamente os grupos de barras para cada tipo de análise.

Os resultados acima são suficientes para indicar áreas do sistema ESCELSA sujeitas à compensação de potência reativa visando um melhor desempenho do sistema. A aplicação a outras empresas do setor elétrico, e mesmo ao sistema interligado, é direta e traz benefícios, uma vez que as barras sujeitas à compensação de potência reativa são facilmente identificadas.

Em função dos resultados apresentados, o planejamento da ESCELSA recomendou a instalação de compensação de potência reativa segundo a Tabela I, sugerindo compensação na Barra de Viana, Barra 91, com dois bancos de 50 MVAR, visto ser esta barra que traz o maior impacto técnico para o menor montante de compensação. Isso deve se refletir em um melhor desempenho econômico, muito embora esta análise não tenha sido foco deste estudo. Note que o estudo aqui realizado focou o planejamento do sistema em relação à área que apresentou maior déficit de potência reativa, de forma que os estudos anteriormente realizados não foram confrontados.

VII. CONCLUSÕES

Uma metodologia para identificação de barras críticas sob o ponto de vista de estabilidade de tensão e mercado de potência reativa foi proposta. As barras críticas são identificadas pela curva QV (as barras com menor margem são as mais críticas para cada ponto operativo), enquanto que as barras com monopólio de potência reativa são obtidas através do índice HHI.

Testes com o sistema da ESCELSA foram executados, qualificando a proposta como robusta para aplicação em sistemas reais. Observou-se que as análises devem ser feitas separadamente, uma vez que as metodologias podem indicar grupos diferentes de barras, recomendando que as ações de controle devam ser tomadas considerando a prioridade do sistema.

Uma conclusão importante é a aplicação da curva QV na análise de estabilidade de um sistema. É preciso destacar a diferença de aplicação em relação à curva PV. Esta última avalia o sistema todo, identificando a área com problemas de

um sistema elétrico. Por sua vez a curva QV consegue demonstrar o ganho que cada barra do sistema quando um reforço, ou conjunto de reforços, é inserido no sistema. Às vezes o reforço não é instalado na área detectada pela curva PV, e o ganho obtido pelo sistema não detectado pela metodologia da curva PV. Logo, as metodologias das curvas PV e QV são complementares com relação às informações. Uma análise não elimina a outra, e sem dúvida, são conhecimentos que os analistas podem utilizar para tomar decisões importantes.

VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. C. Zambroni de Souza, "Discussion on Some Voltage Collapse Indices", *Electric Power Systems Research*, Vol. 53, No. 1, pp. 53-58, January 2000.
- [2] T. Van Cutsem, C. Vournas, "Voltage Stability of Electric Power Systems", Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [3] C. A. Cañizares and F. L. Alvarado, "Point of Collapse and continuation methods for large ac/dc systems," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 8, no. 1, February 1993, pp. 1-8.
- [4] Ajarapu, V., Christy, C., "The Continuation Power Flow: a Tool for Steady State Voltage Stability Analysis", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, No. 1, February 1992, pp. 416-423.
- [5] A. C. Zambroni de Souza, M. Glavic, F. Alvarado, "The Effect of Loading on Reactive Market Power," *Hawaii International Conference on Systems Science*, Maui, Hawaii, 03-06 janeiro 2001.
- [6] Mohn, Fritz Walter, A. C. Zambroni de Souza, Tracing PV and QV Curves with the Help of a CRIC Continuation Method. *IEEE Transactions on Power Systems*, v.21, p.1104 - 1114, 2006.
- [7] Fritz Walter Mohn, A. C. Zambroni de Souza, "On fast decoupled continuation power flows", *Electric Power Systems Research* 63 (2002) 105/ 111.
- [8] D. A. Alves, L. C. P. da Silva, C. A. Castro e V. F. da Costa., "Continuation fast decoupled power flow with secant predictor", accepted for publication by *IEEE Transactions on Power Systems*.
- [9] D. A. Alves, L. C. P. da Silva, C. A. Castro, and V. F. da Costa, "Parameterized fast decoupled load flows for tracing the power systems bifurcation diagrams," 1999 Proc. IEEE PES Summer Meeting , pp. 708-713.