

# Alocação Ótima de Equipamentos FACTS em Sistemas Elétricos de Potência

J. W. Marangon Lima, A. C. Zambroni de Souza, Leonardo H. de Mello, B. I. Lima Lopes, Clodomiro Unshuay, R. Coradi Leme, Wellington Dias, – UNIFEI, A. A. Chaves Arruda, R. L. Tompson – CTEEP

**Resumo-** A instalação de equipamentos associados ao uso de eletrônica de potência, ou seja, FACTS (Flexible AC Transmission Systems), tem se tornado uma realidade em sistemas elétricos de potência proporcionando um maior controle e flexibilidade desses sistemas. Um problema que este trabalho tenta resolver se refere à alocação ótima destes equipamentos com o objetivo de usar mais intensamente os elementos existentes na rede prorrogando a necessidade de investimentos mais drásticos no sistema de transmissão. Três metodologias de análise são propostas visando determinar uma política de compensação série de algumas linhas de transmissão. Assim, uma técnica para a determinação do local e montante de compensação é apresentada, o que requer a execução de um processo de otimização estática. Após esta fase, a análise dinâmica do sistema é executada, onde os efeitos da compensação série na interação máquinas-e rede elétrica são analisados. De forma a tornar o processo amigável ao usuário, uma interface gráfica foi desenvolvida tornando a análise mais interessante fornecendo ao usuário uma visão mais concisa dos efeitos da compensação na rede.

**Palavras-chave**—compensação série, otimização, análise dinâmica, cálculo de autovalores, sistemas de potência.

## I. INTRODUÇÃO

Problemas ambientais e restrições econômicas têm tornado a operação e o planejamento dos sistemas elétricos uma tarefa cada vez mais complexa. Além deste problema, a questão da descentralização dos sistemas elétricos também inseriu novos elementos de análise, já que a competição entre as empresas estabeleceu novos paradigmas em relação à operação e ao planejamento destes sistemas. Ganham força, neste cenário, técnicas de análise que reduzam os custos de investimento sem o comprometimento das condições operativas. Entre estas alternativas, encontra-se o uso de FACTS no sistema elétrico. Neste trabalho, o problema da compensação série de linhas de transmissão é particularmente analisado.

A idéia de se compensar as linhas de transmissão vem da necessidade de aproximar as barras do sistema, já que esta compensação tem o efeito de reduzir a reatância das linhas. Todavia, a localização e a determinação do montante de compensação merecem especial atenção. Desta forma, este trabalho utiliza técnica de otimização para resolver estas duas questões.

Um outro problema ligado à compensação série de linhas de transmissão refere-se ao problema de ressonância subsíncrona (RSS). De acordo com IEEE [1], RSS é um fenômeno dinâmico caracterizado por uma condição na qual o sistema elétrico troca energia com as turbinas. Este fenômeno ocorre para uma ou mais frequências do sistema combinado abaixo da frequência síncrona.

Estes resultados são melhor analisados se um programa amigável estiver acoplado. Com este objetivo, uma seção

especial a respeito do processo de interface é apresentada. Esta interface é descrita aqui em função do ineditismo da mesma. As seções seguintes são devotadas à apresentação dos itens anteriormente descritos.

## II. CUSTO DE INVESTIMENTO DOS EQUIPAMENTOS FACTS

O custo de investimento em equipamentos FACTS pode ser dividido em duas categorias [1]: (a) Custo do equipamento FACTS propriamente dita, e (b) O custo da infra-estrutura necessária para sua instalação.

### (a) Custo do Equipamento

Os custos dos equipamentos não dependem apenas da faixa de instalação já que isto também depende de requisitos especiais tais como:

- Redundância do sistema de controle e proteção ou outros componentes adicionais tais como reatores, capacitores ou transformadores.
- Condições sísmicas,
- Condições ambientais, (temperatura, nível de poluição, etc.).
- Comunicação com o sistema de controle da subestação ou com o operador nacional do sistema.

### (b) Custos da Infra-estrutura

Os custos de infra-estrutura dependem da localização onde os dispositivos FACTS podem ser instalados, esses custos incluem por exemplo:

- Aquisição do terreno, se não houver suficiente espaço na subestação existente.
- Modificação da subestação existente, se um novo interruptor de alta tensão é requerido.
- Construção de uma estrutura para os equipamentos internos do FACTS, etc.

Para faixas típicas de operação dos equipamentos FACTS, os limites inferiores das áreas de custo mostradas na figura (1) indicam os custos dos equipamentos enquanto que os limites superiores indicam o custo total de investimento incluindo o custo da infra-estrutura [2]. Para baixas faixas de operação, os custos podem ser muitos altos e para faixas de operação bem altas, estes podem ser bem baixos tal como é mostrado na figura (1). O custo total de investimento mostrado, que é dependente das taxas de juros e impostos, podem variar devido aos fatores descritos, de -10% até + 30%. Considerando as taxas de juros e impostos,

que podem variar significativamente entre diferentes fases, os custos totais de investimento para os equipamentos FACTS podem alterar significativamente a sua viabilidade econômica..

Na figura (1) os termo TCSC representa o compensador série controlada a tiristor, o TSSC representa o compensador série chaveado a tiristor e o UPFC representa o controlador unificado de fluxo de potência

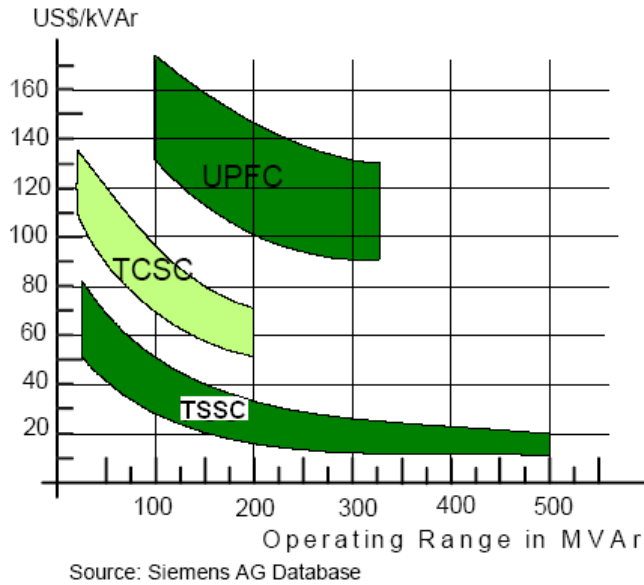


Figura 1 : Custos de Investimentos Típicos de um TSSC, TCSC e UPFC.

### III. BENEFÍCIOS ECONÔMICOS DOS EQUIPAMENTOS FACTS

Existem três áreas onde os benefícios econômicos poderiam facilmente ser calculados [2].

1. Receita bruta adicional devido ao incremento da capacidade de transmissão.
2. Encargos adicionais por serviço de transporte devido ao incremento da capacidade de transmissão.
3. Evitando ou atrasando investimentos em novas linhas de transmissão ou novas usinas de geração.

Se por exemplo, for usado um equipamento FACTS, a capacidade numa linha de transmissão poderia ser incrementado em 50 MW ( p. e. para linhas de transmissão de 132 kV ou maiores), isto poderia gerar receita bruta adicional equivalente aos 50 MW adicionados. Assumindo um fator de carga de 100 % e uma receita bruta de 0.02 US\$/kWh, isto poderia resultar em uma receita bruta adicional anual de mais de US\$ 8.8 milhões.

Em outro exemplo [2] assume-se que os custo de investimento de uma linha de 400 kV, com 300 km de comprimento é de US\$ 45 milhões. A uma taxa de retorno de 10 %, este resulta em um custo anual de US\$ 4.5 milhões. A instalação de um equipamento FACTS com custo de US\$ 20 milhões poderia ser economicamente justificada, se o investimento desta LT fosse postergado em 5 anos (5 x 4.5 = 22.5 milhões). Algumas questões relativas a custos destes equipamentos podem ser encontradas em [3]-[6].

### IV. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O problema clássico de alocação de FACTS está representado na Equação 1. Neste caso, o equipamento FACTS considerado é a compensação série onde a função objetivo é contrapor o custo do equipamento com o ganho no custo de produção associado aos geradores térmicos.

$$\text{Min} \left( \sum_{i=1}^{ng} c_i \times G_i + \sum C_{\text{facts}} \right) \quad (1)$$

sujeito a

$$\mathbf{G} - \mathbf{B}_{CS} \boldsymbol{\theta} = \mathbf{L} + \mathbf{I}_{DE} \quad (2.1)$$

$$\underline{G}_i \leq G_i \leq \overline{G}_i \quad (2.2)$$

$$-\overline{\mathbf{F}}^0 \leq \mathbf{F} \leq \overline{\mathbf{F}}^0 \quad (2.3)$$

onde:

$c_i$  custo de geração do gerador  $i$  (US\$/MWh).  $i=1, \dots, ng$ .  
 $ng$  é o número de barras com geradores térmicos.

$G_i$  geração de potência ativa na barra  $i$ .

$C_{\text{facts}}$  custo dos dispositivos FACTS (US\$/ano).

$\mathbf{B}_{CS}$  matriz de susceptância de barra, a qual inclui a variação da susceptância devido a compensação série de ordem  $(nb \times nb)$ , onde  $nb$  é o número de barras do sistema.

$\mathbf{V}$  vetor de geração ativa de ordem  $(nb \times 1)$ . Nas barras sem geração, os elementos do vetor são iguais a zero.

$\boldsymbol{\theta}$  vetor de ângulos das barras de ordem  $(nb \times 1)$ .

$\mathbf{L}$  vetor de carga ativa de ordem  $(nb \times 1)$ .

VI.  $\mathbf{L}$

$\mathbf{I}_{DE}$  vetor de injeção de potência representando o defasador de ordem  $(nb \times 1)$ .

$\underline{G}_i$  e  $\overline{G}_i$  limites de geração na barra  $i$ .

$\mathbf{F}$  vetor de fluxos nos circuitos de ordem  $(nl \times 1)$ , onde  $nl$  é o número de circuitos.

$\overline{\mathbf{F}}^0$  vetor de limite de fluxo nos circuitos de ordem  $(nl \times 1)$ . Estes limites geralmente estão associados com limites de estabilidade dinâmica e tensão e não, com o limite térmico da linha.

Um algoritmo usando programação linear (PL) pode ser desenvolvido para solucionar o problema (1). Dado que a restrição 1.1 provoca a perda da linearidade, pois a matriz  $\mathbf{B}_{CS}$  é variável juntamente com os ângulos das barras, a idéia foi utilizar um processo iterativo para evitar a não linearidade do problema. Para tanto, a matriz de susceptância a qual

inclui a CS,  $\mathbf{B}_{CS}$ , é decomposta em dois componentes, a fim de separar a reatância fixa da compensação série variável:

$$\mathbf{B}_{CS} = \mathbf{B} + \Delta\mathbf{B} \quad (2)$$

onde:

$\mathbf{B}$  é a matriz de susceptância inicial de ordem (nb x nb), ou seja, sem a compensação série, portanto com elementos fixos.

$\Delta\mathbf{B}$  é a matriz de variação de susceptância de ordem (nb x nb), ou seja, devido a compensação série.

Para uma compensação série de  $\Delta\gamma$  na linha ij, a matriz de variação de susceptância para esta compensação é dada por:

$$\Delta\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \Delta\gamma & 0 & \dots & -\Delta\gamma & 0 \\ & & & \vdots & & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -\Delta\gamma & 0 & \dots & \Delta\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{linha-i} \\ \\ \\ \text{linha-j} \end{array}$$

col-i                      col-j

Note que, se existir compensação série em outros circuitos do sistema, a matriz  $\Delta\mathbf{B}$  representará a soma de todas as combinações acima.

Substituindo a expressão (2) nas equações de fluxo de carga (1.1), tem-se para a inclusão da CS:

$$\mathbf{G} - \mathbf{B} \boldsymbol{\theta} - \Delta\mathbf{B} \boldsymbol{\theta}' = \mathbf{L} \quad (3)$$

onde

$\boldsymbol{\theta}'$  é o vetor dos ângulos das barras, obtidos da iteração anterior. Adotando-se este procedimento, a não linearidade da equação (1.1) desaparece.

## V. MÉTODO PRIMAL-DUAL DE PONTOS INTERIORES

Embora métodos de Pontos Interiores (PI) com barreira logarítmica tenham sido originalmente desenvolvidos para resolver problemas gerais de PNL, pesquisas sobre métodos PI para grandes sistemas de PNL foram motivadas princi-

palmente pela excelente performance de tais métodos na resolução de problemas de PL de grande dimensão.

O algoritmo descrito aqui pertence a uma classe de algoritmos mostrados em [10,11,12] e são utilizados para problemas da forma;

$$\begin{aligned} &\text{Minimize } C.x \\ &\text{Sujeito a} \quad A.x = b \quad (4) \\ &\quad \underline{F} \leq F.x \leq \overline{F} \\ &\quad \underline{X} \leq X \leq \overline{X} \end{aligned}$$

Onde  $x \in \mathbb{R}^n$  é o vetor de variáveis de decisão,  $C.x: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  é a função objetivo,  $A.x - b: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$  é um vetor de funções lineares, e  $F.x: \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^p$  é um vetor de as funções de restrições de desigualdade com limites  $F_{max}$  e  $F_{min}$ , e  $X$  variáveis funcionais lineares com limite inferior  $x_{min}$  e limite superior  $x_{max}$ . Se  $x^*$  é um mínimo local, então existem multiplicadores de Lagrange ( $\lambda^*, \pi_1^*, \pi_2^*, \pi_3^*, \pi_4^*$ ) que satisfazem as condições necessárias de otimalidade de Karush-Kuhn-Tucker (KKT):

$$\begin{aligned} \nabla_x L(w) &= C + A^T \lambda + F^T \pi_1 - I \pi_3 \\ \nabla_\lambda L(w) &= Ax - b \\ \nabla_{\pi_1} L(w) &= Fx + s_1 - \overline{F}x \\ \nabla_{\pi_2} L(w) &= \underline{F}x + s_2 + s_3 - \underline{F}x \\ \nabla_{\pi_3} L(w) &= X + s_3 - \overline{X} \\ \nabla_{\pi_4} L(w) &= \underline{x} + s_3 + s_4 + \overline{x} \\ \nabla_{s_1} L(w) &= -\mu_k \frac{1}{S_1} + \pi_1 + \pi_2 \\ \nabla_{s_2} L(w) &= -\mu_k \frac{1}{S_2} + \pi_2 \\ \nabla_{s_3} L(w) &= -\mu_k \frac{1}{S_3} + \pi_3 + \pi_4 \\ \nabla_{s_4} L(w) &= -\mu_k \frac{1}{S_4} + \pi_4 \end{aligned} \quad (5)$$

onde  $s_1, s_2, s_3, s_4$  são variáveis de folgas.

Problema Modificado e Condições de Otimalidade

O algoritmo primal-dual de PI para resolver o problema de PL (5) opera sobre um problema modificado que emerge quando transformamos todas as desigualdades em igualdades através da adição dos vetores de folgas  $s_1 \geq 0, s_2 \geq 0, s_3 \geq 0, s_4 \geq 0$  como segue:

$$\begin{aligned} &\text{Minimize } C.x \\ &A.x - b = 0 \\ &Fx + s_1 - \overline{F} = 0 \\ &\underline{F} + s_1 + s_2 - \underline{F} = 0 \\ &x + s_3 - \overline{x} = 0 \\ &\underline{x} + s_3 + s_4 - \underline{x} = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
& \text{Minimize } Cx \\
& \text{Sujeito a} \quad Ax = b \\
& \quad \underline{F} \leq Fx \leq \overline{F} \\
& \quad \underline{X} \leq X \leq \overline{X}
\end{aligned} \quad (7)$$

As condições de não-negatividade ( $s_1, s_2, s_3, s_4$ )  $\geq 0$  em (7) são então incorporadas em funções de barreira logarítmica agregadas a função objetivo, fornecendo o problema modificado

$$\begin{aligned}
& \text{Minimizar } Cx - \mu_k \sum_{i=1}^p (\ln s_i + \ln s_2 + \ln s_3 + \ln s_4) \\
& \text{Sujeito a}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Fx + s_1 - \overline{F} &= 0 \\
\underline{F} + s_1 + s_2 - \overline{F} &= 0 \\
x + s_3 - \overline{x} &= 0 \\
\underline{x} + s_3 + s_4 - \overline{x} &= 0 \quad (8)
\end{aligned}$$

As condições de positividade estrita  $s_1 > 0$  e  $s_2 > 0$   $s_3 > 0$   $s_4 > 0$  devem ser impostas para que os termos logaritmos sejam definidos. Entretanto, estas condições são tratadas implicitamente, conforme é descrito abaixo. E  $\mu_k$  é um parâmetro de barreira, seu valor vai decrescendo assintoticamente a cada nova iteração. Para um ponto convergido,  $\mu_k$  é igual a zero.

As condições necessárias de otimalidade para o problema com restrições de igualdades, com  $\mu_k$  fixo, podem ser derivadas da função de Lagrange  $L(y; \mu_k)$ , é definida como:

$$\begin{aligned}
L(y; \mu_k) = & Cx + \lambda(Ax - b) + \pi_1(Fx + S_3 - \overline{F}x) + \pi_2(\underline{F} + s_3 + s_4 - \overline{F}x) \\
& + \pi_3(\underline{x} + s_1 - \overline{x}) + \pi_4(\underline{x} + s_1 + s_2 - \overline{x}) - \mu_k \ln(s_1) - \mu_k \ln(s_2) - \mu_k \ln(s_3) - \mu_k \ln(s_4) \quad (4.5)
\end{aligned}$$

onde  $\lambda \in \mathbb{R}^m$ ,  $\pi \in \mathbb{R}^p$  e  $v \in \mathbb{R}^p$  são vetores de multiplicadores de Lagrange, conhecidos como variáveis duais, e  $y = (x, \lambda, \pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, s_1, s_2, s_3, s_4)$ . Um mínimo local de (4.5) é caracterizado por um ponto estacionário de  $L(y; \mu_k)$ , o qual deve satisfazer as condições de primeira-ordem de Karush-Kuhn-Tucker (KKT)

$$\begin{aligned}
\nabla_x L(w) &= C + A^T \lambda + F^T \pi_1 - I \pi_3 \\
\nabla_\lambda L(w) &= Ax - b \\
\nabla_{\pi_1} L(w) &= Fx + s_1 - \overline{F}x \\
\nabla_{\pi_2} L(w) &= \underline{F}x + s_2 + s_3 - \overline{F}x \\
\nabla_{\pi_3} L(w) &= \underline{x} + s_3 - \overline{x} \\
\nabla_{\pi_4} L(w) &= \underline{x} + s_3 + s_4 + \overline{x} \\
\nabla_{s_1} L(w) &= -\mu_k \frac{1}{s_1} + \pi_1 + \pi_2 \\
\nabla_{s_2} L(w) &= -\mu_k \frac{1}{s_2} + \pi_2 \\
\nabla_{s_3} L(w) &= -\mu_k \frac{1}{s_3} + \pi_3 + \pi_4 \\
\nabla_{s_4} L(w) &= -\mu_k \frac{1}{s_4} + \pi_4
\end{aligned} \quad (9)$$

Onde  $e = (1, 1, \dots, 1)^T$ . O sistema é mais convenientemente expresso como

$$\begin{aligned}
S_1 &= (\pi_3 + \pi_4) - \mu_k = 0 \\
S_2 &= (\pi_4) - \mu_k = 0 \\
S_3 &= (\pi_1 + \pi_2) - \mu_k = 0 \\
S_4 &= (\pi_2) - \mu_k = 0
\end{aligned} \quad (10)$$

Se o sistema (9) for representado compactamente como  $\nabla L(y; \mu_k) = 0$  e o sistema (10) como  $\nabla L(y; \mu_k) = 0$ , então temos a seguinte relação entre esses sistemas:

$$\nabla L(y; \mu_k) = \nabla L(y) - \mu_k u \quad (11)$$

Onde  $u = (e, 0)$ , com  $e \in \mathbb{R}^{2p}$  e  $e \in \mathbb{R}^{2p+n+m}$ . Uma iteração do método primal-dual de PI para resolver (9) invariavelmente aplica um passo do método de Newton para achar raízes de equações sobre (10) calcula um comprimento de passo na direção de Newton, atualiza as variáveis, e reduz  $\mu_k$ . O algoritmo termina quando a inviabilidade primal e dual e o resíduo de complementaridade estão abaixo de tolerâncias pré-determinadas. Uma vez que somente um passo de Newton é considerado a cada iteração, as iterações têm a forma geral

$$y_{k+1} = y_k - \alpha_k [\nabla^2_{yy} L(y_k)]^{-1} \nabla L(y_k), \quad k=0, 1, \dots \quad (12)$$

Onde  $\alpha_k \in (0, 1]$  é um fator de amortecimento para melhorar a convergência e para manter as variáveis não-negativas estritamente positivas. Uma vez que  $\nabla^2_{yy} L(y; \mu_k) = \nabla^2_{yy} L(y)$ , as iterações que são geradas por (4.9) podem ser expressas como:

$$y_{k+1} = y_k - \alpha_k [\nabla^2_{yy} L(y_k)]^{-1} (\nabla L(y_k) - \mu_k u) \quad k=0, 1, \dots \quad (13)$$

Portanto, a direção de busca utilizada em (13) possui duas componentes: (i) a direção affine-scaling  $-\nabla L(y_k) - \mu_k u$ , e (ii) a direção de centralização  $-\mu_k u$ , uma componente que não está presente em (6) e que dirige as variáveis não-negativas para longe da

fronteira.

### Algoritmo Primal-Dual de Pontos Interiores

Um ponto inicial estritamente viável não é mandatório para o método primal-dual de PL. Porém, as condições de estrita positividade  $(s_1, s_2, s_3, s_4) > 0$  e  $(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4) > 0$  devem ser satisfeitas em todos os pontos. O processo iterativo parte de um ponto  $y_0 = (s_{10}, s_{20}, \pi_{10}, \pi_{20}, x_0, \lambda_0)$  que satisfaz  $(s_{10}, s_{20}) > 0$  e  $(\pi_{10}, \pi_{20}) > 0$  e, para preservar estas condições, as iterações seguem uma trajetória no ortante positivo do espaço de produtos de complementariedade  $s_1 \pi_1$ ,  $s_2 \pi_2$ . A viabilidade das iterações é alcançada gradativamente durante o processo iterativo, a medida que as iterações aproximam-se da otimalidade. Os passos principais do algoritmo primal-dual de PI são como segue:

PASSO 0: Fazer  $k=0$ , escolher  $\mu_0 > 0$  e um ponto inicial  $y_0 = (s_0, \pi_0, x_0, \lambda_0)$  que satisfaça as condições de estrita positividade

PASSO 1: Resolver por Newton, o sistema originado pelas condições de 1ª ordem

$$\nabla^2 y L(y, \mu_k) \Delta y = -\nabla y L(y_k, \mu_k)$$

E obter a direção de Newton  $\Delta y$

PASSO 2: Calcular o comprimento de passo  $\alpha_k$  na direção de Newton  $\Delta y$  e obter o novo ponto  $y_{k+1} = y_k + \alpha_k \Delta y$

PASSO 3: Se  $y_{k+1}$  satisfaz o critério de convergência, pare, caso contrário fazer  $K = k + 1$ , reduzir o parâmetro de barreira  $\mu_k$  e voltar ao passo 1.

## VI. TÉCNICA DE ANÁLISE DINÂMICA

O que se busca nesta seção é acoplar o problema de estabilidade dinâmica à análise de bifurcação de Hopf, associada a oscilações do sistema elétrico. Como na referência [7], o menor valor singular de uma função de uma matriz de estado modificada  $A_m$  pode ser usado para detectar bifurcação de Hopf. Este índice é dado por:

$$HBI = \sigma_{\min}(A_m) \quad (14)$$

$$\text{Onde, } A_m = \begin{bmatrix} A & \beta I_n \\ -\beta I_n & A \end{bmatrix}$$

$A$  é a forma reduzida do Jacobiano do sistema, dada por:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \text{ e } \Delta \dot{x} = (J_1 - J_2 J_4^{-1} J_3) \Delta x = A \Delta x$$

O parâmetro  $\beta$  é a parte imaginária do autovalor de  $A$  que se anula. Este índice foi proposto para detectar bifurcações de Hopf em tempo real, com o objetivo de permitir a tomada de ações de controle preventivas ou corretivas em sistemas estressados. Para este fim, um comportamento previsível do índice se faz importante, de forma a se poder estimar o ponto de bifurcação a partir de um ou dois pontos operativos conhecidos. A Referência [7] mostra que o índice HBI pode fornecer este comportamento, dado que sua variação ao longo da variação de carga se mostra linear. Entretanto, dado que este índice se baseia no menor valor singular, é possível que outros sistemas apresentem um comportamento dife-

rente. Uma outra questão importante a respeito deste índice refere-se à frequência do par de autovalores que cruza o eixo imaginário. Este índice, proposto para análise de variação de carga é considerado aqui também para a condição em que compensação série nas linhas é considerada.

Para o caso de ressonância sub-síncrona (RSS), prever bifurcações de Hopf pode não ser uma urgência, pois isso deve ser analisado na fase de planejamento. No entanto, dado que o índice HBI pode ser empregado para qualquer modelo de sistema, este índice será usado também para esta classe de problema. Logo, o índice proposto aqui pode ser usado para os cenários de operação e planejamento de sistemas de potência.

A principal diferença entre as análises de estabilidade e de RSS reside no fato de RSS estar associada a informações relativas à frequência dos autovalores com parte real nula. Esta informação pode ser extraída a partir dos modos torsionais do eixo turbina-gerador considerado.

A variação de compensação série em uma linha de transmissão muda a frequência da rede consideravelmente. Isto também acontece com a frequência crítica do eixo da turbina analisado, na medida em que o ponto de bifurcação se aproxima. Assim, é possível que o índice HBI não se anule na medida em que o nível de compensação variar, já que  $\beta$  também varia. Este problema é superado através da atualização do valor de  $\beta$  em cada ponto.

Considerando esta dificuldade, um outro índice é proposto para identificar bifurcações de Hopf. Isto é feito através do cálculo de um número reduzido de autovalores, conforme proposto em [8]. Este conjunto de autovalores é determinado a partir dos modos de oscilação dos eixos geradores. Esta informação é obtida de acordo com a análise proposta em [9], que é baseada no conhecimento prévio das frequências naturais, entre outros dados do eixo. Considere o conjunto  $\Sigma = \{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_k\}$ , onde  $\sigma_k$  estão associados com as partes reais do conjunto reduzido de autovalores da matriz Jacobiana.

É proposto um índice baseado na média geométrica dos valores absolutos de  $\Sigma$ .

$$IND = \begin{cases} \sqrt[n]{\prod_{k=1}^n |\sigma_k|} \Rightarrow \{\sigma_k \in \Sigma / \sigma_k > 0\} = \emptyset \\ -\sqrt[n]{\prod_{k=1}^n |\sigma_k|} \Rightarrow \{\sigma_k \in \Sigma / \sigma_k > 0\} \neq \emptyset \end{cases} \quad (15)$$

## VII. INTERFACE DESENVOLVIDA

A interface desenvolvida neste projeto tem por objetivo ampliar a capacidade de análise do sistema por parte do usuário. Implementada em realidade virtual, os elementos do sistema ficam dispostos sobre um mapa respeitando sua posição georeferenciada e apresenta um sistema de cor capaz de identificar sobrecargas nas linhas sobretensões nas barras e outras características do sistema. Desta forma o usuário pode rapidamente identificar áreas em pontos de operação indesejados e atuar sobre o sistema de forma corretiva. As Figuras 1, 2 e 3 mostram algumas telas da interface.

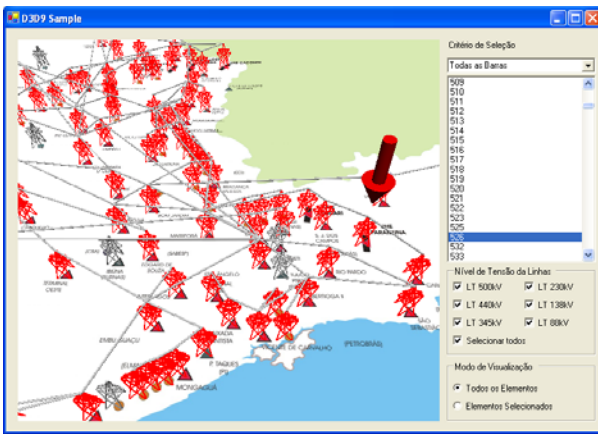


Figura 1 – Tela de visualização do Sistema com todas as barras selecionadas e com zoom sobre o litoral norte de São Paulo.

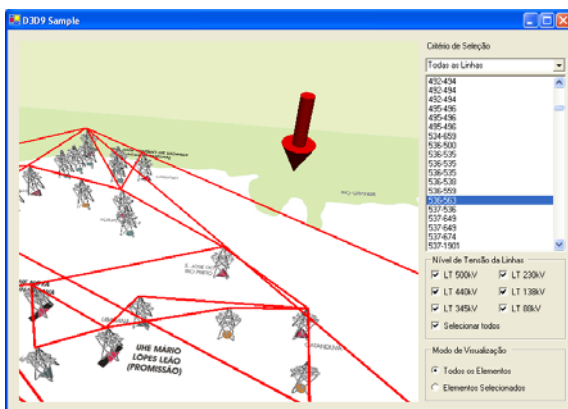


Figura 2 – Tela de visualização do Sistema com todas as linhas selecionadas e com zoom sobre o noroeste do estado de São Paulo.

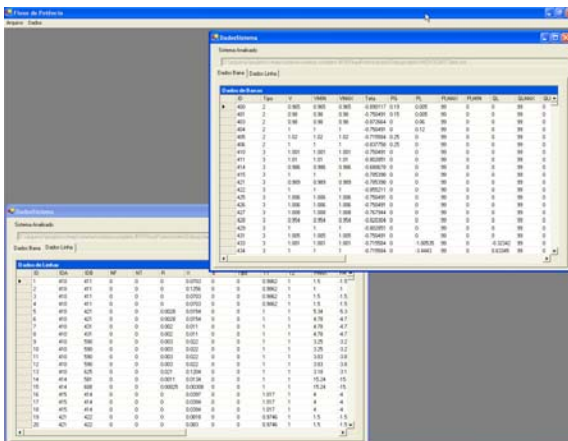


Figura 3 – Tela de dados do Sistema com dados de barras e linhas.

## VIII. CONCLUSÃO

A instalação de equipamentos associados ao uso de eletrônica de potência, ou seja, FACTS (Flexible AC Transmission Systems), tem se tornado uma realidade em sistemas elétricos de potência proporcionando um maior controle e flexibilidade desses sistemas. Este trabalho apresentou uma solução para alocação ótima destes equipamentos com o objetivo de usar mais intensamente os elementos existentes na rede. Três metodologias de análise foram propostas visando

determinar uma política de compensação série de algumas linhas de transmissão. Assim, uma técnica para a determinação do local e montante de compensação foi apresentada, o que requer a execução de um processo de otimização estática. Após esta fase, a análise dinâmica do sistema é executada, onde os efeitos da compensação série na interação máquinas-e rede elétrica são analisados. De forma a tornar o processo amigável ao usuário, uma interface gráfica foi desenvolvida tornando a análise mais interessante fornecendo ao usuário uma visão mais concisa dos efeitos da compensação na rede.

Existe ainda a necessidade de integrar a análise dinâmica com a análise estática desenvolvida neste trabalho. Esta análise dinâmica irá permitir incorporar controles associados à compensação que poderão inclusive melhorar o desempenho dinâmico do sistema.

## IX. REFERÊNCIAS

- [1] IEEE SSR WORKING GROUP. Proposed Terms and Definitions for Subsynchronous Resonance. *IEEE Symposium on Countermeasures for Subsynchronous Resonance*, IEEE Pub. 81TH0086-9-PWR, pp. 92-97, 1981.
- [2] K. Habur, and D. O'leary, "FACTS - flexible AC transmission systems, For cost effective and reliable transmission of electrical energy," World Bank, 2001.  
[http://www.worldbank.org/html/fpd/em/transmission/facts\\_siemens.pdf](http://www.worldbank.org/html/fpd/em/transmission/facts_siemens.pdf)
- [3] J. W. Marangon Lima, E. J. Oliveira, K. C. Almeida, Allocation of FACTS Devices in Hydrothermal Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*. Nova York: , v.15, n.1, p.276 - 282, 2000.
- [4] K.K. Sen, "SSSC - Static Series Synchronous Compensator: Theory, Modelling and Applications", *IEEE PES Winter Meeting*, PE-862-PWRD-0-04-1997.
- [5] J. Griffin, D. Atanackovic, F.D. Galiana, "A study of the Impact of FACTS on the Secure-economic Operation of Power Systems", *12th Power Systems Computation Conference*, pp.1077-1082, Dresden, August 19-23, 1996.
- [6] L.J. Cai and I. Erlich, "Optimal Choice and Allocation of FACTS Devices using Genetic Algorithms", *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems (ISAP 2003)*. , 2003. v.1. p.1 - 6, Lemmos Grécia.
- [7] N. Mithulanathan, C. A. Cañizares, J. Reeve. "Indices to Detect Hopf Bifurcations in Power Systems", *Thirty-Second Annual North American Power Symposium Proceedings*, Vol. II, pp. 15-18 to 15-24, Oct. 2000.
- [8] J. M. Campagnolo, N. Martins, D. M. Falcão. "Refactored Bi-Iteration: A High Performance Eigen-solution Method for Large Power System Matrices". *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 11, No. 3, pp. 1228-1235, August 1996.
- [9] IEEE SSR WORKING GROUP. "Terms, Definitions and Symbols for Subsynchronous Oscillations". IEEE

Transactions on Power Apparatus and Systems, vol.  
PAS-104, No. 6, June 1985.