



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GOP 11
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO IX

GRUPO DE ESTUDO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – GOP

INVESTIGAÇÃO DA APLICAÇÃO DO ESTIMADOR DE ESTADO NO CONTROLE DA ESTABILIDADE DE TENSÃO EM TEMPO REAL

Cleider Trindade Ambrósio*

CEMIG DISTRIBUIÇÃO S.A.

RESUMO

Na rotina diária dos Centros de Supervisão e Controle é habitual a necessidade de tomada de decisões em curto espaço de tempo. Muito se tem feito para aprovisionar os Centros de Supervisão e Controle de ferramentas que facilitem as tomadas de decisões em condições adversas com segurança e menor tempo.

Os estimadores de estado são um exemplo de ferramenta que tem dado grande suporte na supervisão do Sistema Elétrico de Potência pelos Centros de Supervisão e Controle. Por outro lado temos diversos fatores que interferem no controle da estabilidade de tensão em tempo real, muito deles percebidos apenas após o impacto de seus efeitos na tensão quando é atingido o ponto de instabilidade.

Com esse trabalho pretende-se investigar a possibilidade de utilização dos estimadores de estado para sinalização da aproximação do ponto de instabilidade de tensão, permitindo aos controladores do Sistema Elétrico de Potência a tomada de decisões para resguardar a estabilidade de tensão.

PALAVRAS-CHAVE

Centro de Supervisão e Controle, Estabilidade de Tensão, Estimador de Estado

1.0 - INTRODUÇÃO

Os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) possuem um comportamento dinâmico que está diretamente ligado à característica da carga e sua variação e a outras perturbações. Em determinados momentos, o somatório de fatores, que podem estar ligados à perda de componentes do sistema (linhas de transmissão, unidades geradoras, unidades de transformação, unidades de regulação de tensão, etc.), à elevação de cargas ou à combinação destes, pode levar o SEP a um colapso de tensão. Atentos a tudo isso estão os Centros de Supervisão Controle (CSC) que buscam operar o SEP de maneira a afastá-lo do risco de colapso de tensão, sempre no contexto de garantir uma melhor qualidade de energia entregue aos consumidores.

O comportamento do SEP, para efeito das análises de estabilidade de tensão mediante a variação da carga, tem sido modelado através da camada curva PV, onde, para cargas do tipo potência constante, o ponto de máxima transferência de potência tem sido considerado o ponto de colapso de tensão. Há ferramentas de análise disponíveis no setor que constroem essa curva. Da mesma forma, os CSC dispõem atualmente de ferramentas de supervisão como o estimador de estado que informam em tempo real a condição atual de operação do sistema permitindo seu monitoramento seguro.

A investigação realizada neste trabalho avalia a possibilidade de integração destas duas ferramentas, ou seja,

(*) Av Sebastião Ramos Guimarães, 5, Vila Mauricéia, Montes Claros, MG – CEP 39.401-089
Tel: (38) 3229-5512 – Fax: (38) 3229-5589 – Email: cleider@cemig.com.br

com base nas informações disponibilizadas pelo estimador de estado montar as curvas PV, em tempo real, e verificar o grau de segurança comparando o carregamento atual com o ponto de colapso fornecido pelas curvas geradas.

2.0 - SUPERVISÃO E CONTROLE DO SISTEMA ELÉTRICO

2.1 - Componentes Básicos

Um centro de operação, para ter as condições ideais para supervisão e controle do sistema elétrico, deve ser devidamente estruturado com componentes básicos que incluem equipes de pessoal, meios de comunicação de dados, sistemas computacionais, etc. Tudo isso comportado em instalações adequadas.

Os componentes básicos são:

- Sistema de Aquisição de Dados;
- Sistema de Comunicações;
- Sistema Computacional.

2.2 - Segurança do Sistema Elétrico – Aspectos de Interesse

Para determinação dos procedimentos de segurança são avaliadas as restrições às quais o sistema pode ser submetido. Por sua característica de operação em regime permanente, o SEP está sujeito a restrições de carga e de operação.

As equações de fluxo de potência são suficientes para ajustes no balanço entre geração e carga nas situações que o SEP estiver submetido a restrição de carga.

Para solução dos casos de restrição de operação temos de lançar mãos de inequações. São adotados limites máximos e mínimos para as variáveis do sistema como tensões nas barras, fluxos de potências ativa e reativa nas linhas e transformadores, injeções de potência reativa nas barras de geração e limites de estabilidade eletromecânica e de tensão.

Pelo aspecto de segurança e a partir dos conceitos de restrições de carga e de operação as condições operacionais do sistema podem ser assim classificadas (1):

- a. Estado normal: todas as restrições de carga e de operação estão satisfeitas;
- b. Estado de emergência: há violação das restrições de operação;
- c. Estado restaurativo: recomposição das cargas desligadas numa situação de emergência ou após uma perturbação total (blackout):

2.3 - Funções de Supervisão e Controle

Há diferentes funções que integram os CSC. De maior interesse para este trabalho, tem-se o estimador de estado e o configurador. A seguir são listadas as principais funções que integram os CSC:

2.3.1 - Estimador de Estado

Os CSC recebem uma infinidade de informações oriundas do SEP. A partir dessas informações busca-se saber a condição atual do sistema. Os dados obtidos são extremamente volumosos e ainda apresentam diversas imprecisões.

Para corrigir essas imprecisões são empregados métodos que processam os dados sistematicamente antes que sejam repassados aos operadores ou sejam utilizados por outros programas. A técnica denominada estimação de estado é bastante utilizada na elaboração dos algoritmos que têm a função de tratar as imprecisões.

O estimador de estado calcula as tensões complexas (módulo e ângulo) como variáveis de estado formando as componentes do vetor de estado do sistema. Com as variáveis de estado e conhecendo a configuração atual da rede e seus parâmetros, podem ser estimadas as demais grandezas envolvidas no SEP, tais como:

- Potências ativa e reativa injetadas nas barras de carga;
- Potências ativa e reativa injetadas nas barras de geração;
- Fluxos de potência ativa e reativa nas linhas de transmissão;
- Fluxos de potência ativa e reativa nos transformadores;
- Tensão nas barras;
- Corrente nas linhas de transmissão.

2.3.2 - Observabilidade do Sistema

O estimador de estado é alimentado constantemente por medidas analógicas e pseudomedidas. Se este volume de medições for suficiente e sua distribuição geográfica pelo sistema for adequada, para realização da estimação, diz-se que o sistema é observável.

Isso sugere que a observabilidade é influenciada pelas condições impostas ao sistema, podendo este tornar-se temporariamente não-observável (mudança de configuração da rede ou falhas no sistema de transmissão dos dados, por exemplo).

Questões como essa devem ser avaliadas antes da estimação de estado e são feitas pela análise de observabilidade, que inclui teste de observabilidade, identificação de ilhas observáveis e inclusão de medidas para tornar o sistema observável (1).

2.3.3 - Configurador da Rede

O configurador, baseado nos dados de entrada com as informações da topologia da rede (estáticas) e obtidas em tempo real (dinâmicas), como status de chaves e disjuntores, fornece a configuração atual da rede do SEP (1). O conhecimento atual da topologia da rede é vital para funções "on-line".

Existem muitos modelos de sistemas de configuradores de rede, variando formato dos dados de entrada/saída, lógica de processamento e o formato do banco de dados para armazenamento de informações do configurador. No entanto, para cumprir sua função básica todo configurador de rede obedece a diversos requisitos, tais como:

- Possuir facilidade para abrir e fechar linhas no modelo computacional;
- Possibilitar a subdivisão de subestações em dois ou mais nós;
- Fornecer resultados da forma mais adequada para utilização por outros programas;
- Produzir seus resultados no menor tempo possível;
- Apresentar confiabilidade de resultados, pois são utilizados por diversos programas e apresentados ao operador.

3.0 - ESTABILIDADE DE TENSÃO

Uma das principais atribuições dos CSC, se não a principal, é a garantia da continuidade do fornecimento de energia elétrica. Para cumprir tal atribuição uma das principais atividades relaciona-se ao controle de tensão para mantê-la nos valores padronizados. O controle de reativo é sem dúvida um dos principais recursos no controle de tensão.

Entretanto, mesmo estando a tensão operacional dentro dos limites pré-estabelecidos, o SEP poderá estar sob o risco de perda da estabilidade de tensão.

Várias e diferentes são as definições de estabilidade de tensão, conforme detalhado em (2). Uma das mais utilizadas é aquela do Institute of Electrical & Electronic Engineers (IEEE) que caracteriza a INSTABILIDADE DE TENSÃO como sendo o "estado de operação do sistema, onde a tensão permanece decaindo de forma brusca ou lenta, e as ações automáticas de controle ou dos operadores não evitam tal decaimento".

3.1 - Classificação da Estabilidade de Tensão

Os estudos de estabilidade de tensão são, normalmente, classificados considerando dois aspectos: duração do fenômeno e grau da perturbação. Em (2), as definições encontram-se detalhadas. De forma sucinta, tem-se:

3.1.1 - Classificação Quanto à Duração

a. Estabilidade Transitória de Tensão (2):

Envolve grandes perturbações (curtos-circuitos severos, saída de importantes linhas do sistema) e cargas com dinâmica rápida (motores de indução e conversores CA/CC dos elos de corrente contínua). A escala de tempo vai de milésimos a vários segundos.

b. Estabilidade de Tensão de Longa Duração (2):

Envolve mudanças no comportamento das cargas e transferência de grandes blocos de carga. O colapso de tensão relaciona-se com a lenta restauração da carga, através da atuação dos Comutadores de Tap sob Carga (LTC), com as características das cargas termostáticas e com os limites de corrente dos geradores, síncronos e compensadores estáticos. As ações manuais dos operadores do sistema ou dos consumidores são também relevantes para o fenômeno. O tempo de duração desse tipo de instabilidade de tensão está entre 30 segundos e

meia hora.

3.1.2 - Classificação Quanto à Perturbação

a. Estabilidade de Tensão a Grandes Perturbações:

Nesse grupo incluem-se as estabilidades transitórias e de grande duração que estão associadas às perturbações do tipo, saídas de linha por curto-circuito, perda de grandes blocos de carga, desligamento de importantes geradores do sistema, etc.

b. Estabilidade de Tensão a Pequenas Perturbações:

Nesse grupo estão as perturbações de menor porte que afetam a estabilidade de tensão. Podem ser aqui incluídas as mudanças diárias de carga, atuação de LTC, etc.

3.2 - Influência da Carga na Instabilidade de Tensão

As características das cargas alimentadas pelo SEP são de grande importância para a estabilidade de tensão. É comum dizer-se que a estabilidade de tensão é um fenômeno "load driven", ou seja, acionado pela carga. Sendo assim, é preciso conhecer as formas de modelamento destes componentes para se entender a sua influência no assunto em foco (3).

Um modelo de carga é uma representação matemática da relação entre a tensão em uma barra (amplitude e frequência) e a potência (ativa e reativa) ou corrente fluindo pela carga. Existem dois tipos básicos de modelos de carga: dinâmico e estático (3).

Partindo do pressuposto que no SEP não se observam grandes variações de frequência em relação ao seu valor nominal, normalmente não se avalia sua influência no comportamento da carga.

Nos estudos de estabilidade de tensão, podem ser apresentados três modelos matemáticos básicos para representar as cargas estáticas:

- a. Modelo de Carga do Tipo Impedância Constante (Z_{cte}): a potência varia com o quadrado da magnitude da tensão. Esse modelo é conhecido também como admitância constante.
- b. Modelo de Carga do Tipo Corrente Constante (I_{cte}): a potência varia linearmente com a magnitude da tensão.
- c. Modelo de Carga do Tipo Potência Constante (P_{cte}): a potência não varia com a magnitude da tensão. Esse modelo também é conhecido como MVA constante.

3.3 - Margem de Estabilidade

Indica o quão distante um ponto de operação se encontra do ponto de colapso, podendo ser medida em potência ativa (MW), reativa (MVar) ou aparente (MVA).

As metodologias para avaliação da margem de estabilidade de tensão podem ser classificadas em estáticas, quase-dinâmicas e dinâmicas. Existe grande discussão de qual é a metodologia realmente eficaz na definição da margem de estabilidade.

Neste trabalho é considerado a metodologia estática pois é a mais conhecida e utilizada internacionalmente, principalmente pela simplicidade e rapidez nas simulações. Permite grande varredura de situações às quais o sistema pode ficar submetido. As técnicas mais utilizadas nessa metodologia são as curvas PV e VQ.

Adotaremos a curva PV, metodologia mais difundida internacionalmente para determinação da margem de estabilidade de tensão em grandes sistemas. Consiste em se relacionar a tensão de uma barra do sistema com a carga de uma área, subsistema, sistema (empresa), ou com a carga total do caso sob análise, podendo-se empregar também, determinado fluxo de potência ativa em um intercâmbio importante (2).

Assim, realizam-se aumentos sucessivos na carga do sistema sob análise, monitorando-se a tensão na barra selecionada, até que seja alcançado o ponto de colapso. A diferença entre as cargas do ponto inicial de operação e de colapso determina a margem de potência ativa do sistema.

4.0 - PROPOSTA DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DA MARGEM DE ESTABILIDADE DE TENSÃO EM TEMPO REAL

Em tempo real, os CSC monitoram os sistemas elétricos sob sua supervisão buscando mantê-los nos padrões de segurança de operação. Quanto mais ferramentas existirem para sinalizar a condição real de operação em relação aos limites do sistema, maiores serão as possibilidades de contornar as adversidades às quais o sistema elétrico está sujeito.

A todo tempo são tomadas decisões para resguardar a segurança do sistema e garantir a qualidade do fornecimento de energia elétrica e o estimador de estado pode proporcionar ainda mais informações para sustentar essas decisões.

Abaixo é apresentado o esboço de uma ferramenta que permita, a partir do estimador de estado, disponibilizar um previsor de carga e um construtor de curva PV. Esta ferramenta será denominada: VISUALIZADOR DA MARGEM DE SEGURANÇA NA OPERAÇÃO EM TEMPO REAL.

4.1 - Estrutura Básica

A partir do configurador de rede e do estimador de estado tem-se informações suficientes para alimentar um previsor de carga e montar uma curva que permita visualizar simultaneamente as condições limites de operação de uma determinada barra (curva PV), a condição atual de operação e o ponto previsto de operação projetado para os próximos 15 minutos.

Num primeiro módulo são ajustados os valores das cargas para traçar a curva PV e sua previsão do ponto de operação avançado 15 minutos à frente do instante atual. Neste módulo também será necessário o histórico das cargas verificadas/ajustadas pelo estimador de estado assim como o programa de modulação de carga dos grandes clientes.

A montagem das curvas será feita no segundo módulo e como solução poderá utilizar ferramentas já conhecidas e bastante testadas, principalmente com o recurso o fluxo de potência continuado. Como exemplo pode ser citado o ANAREDE¹ desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL).

No módulo 3 é tratada a visualização das curvas resultantes do módulo 2, permitindo ao usuário estabelecer filtros e configurações que a torne amigável. Os recursos disponibilizados nesse módulo estão relacionados diretamente com o sistema de supervisão e controle utilizado pelo CSC.

Como produto final, a ferramenta VISUALIZADOR DA MARGEM DE SEGURANÇA NA OPERAÇÃO EM TEMPO REAL, fornecerá ao operador do sistema para cada barra selecionada para monitoramento da estabilidade de tensão, a que distância está do ponto de colapso de tensão para a condição de operação atual e no intervalo de 15 minutos.

4.1.1 - Fluxograma

A Figura 1 apresenta a integração da ferramenta VISUALIZADOR DA MARGEM DE SEGURANÇA NA OPERAÇÃO EM TEMPO REAL com as demais funções de supervisão e controle.

4.1.2 - Visualização – IHM

Na tela geral de cada subestação disponível nos sistemas supervisórios, a ferramenta VISUALIZADOR DA MARGEM DE SEGURANÇA NA OPERAÇÃO EM TEMPO REAL estará presente permitindo ao operador de sistema um acesso rápido.

Na Figura 2 é apresentada a proposta de layout para a tela geral de cada subestação definida para monitoramento da estabilidade de tensão. O detalhe da ferramenta VISUALIZADOR DA MARGEM DE SEGURANÇA NA OPERAÇÃO EM TEMPO REAL é apresentado na Figura 3.

5.0 - CONCLUSÕES

Para a elaboração desse trabalho partiu-se do pressuposto que já se dispõe de significativas publicações sobre os temas versados separadamente. Assim foi realizada uma grande busca para se identificar a existência de alguma publicação que apresentasse uma proposta similar àquela aqui apontada.

Foi constatado que as publicações sobre estimador de estado e cálculo de margem de estabilidade são bastante ricas. Por outro lado, após muita pesquisa em publicações do SNTPEE e periódicos do IEEE não foi verificado nenhum documento nesta direção.

¹ ANAREDE – Programa de Análise de Redes

Até então, tais temas têm sido estudados separadamente e a proposta que se fez neste trabalho foi a elaboração de um estudo que permita unir as informações da estabilidade de tensão com a estimação de estado.

A integração das duas ferramentas, estimador de estado e cálculo da margem de estabilidade, é perfeitamente viável e o que é mais importante, a disponibilização de uma ferramenta completa para o CSC que dará uma condição mais favorável para tomada de decisões na supervisão e controle do SEP.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) VALE, M.H.M., “Centros Modernos de Supervisão e Controle de Sistemas de Energia Elétrica”, Dissertação de Mestrado, Orientadores: Falcão, D.M., Pedroso, A.S., Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Dezembro, 1986.

(2) CORTEZ, A.N., “Proposta de Critério e Procedimentos para Avaliação da Estabilidade de Tensão em Sistema Elétricos de Potência”, Dissertação de Mestrado, Orientadora: Vale, M.H.M., Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Fevereiro, 2001.

(3) LOBATO, M.V.C., “Estabilidade de Tensão em Sistemas de Energia Elétrica”, Dissertação de Mestrado, Orientadora: Vale, M.H.M., Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Fevereiro, 1998.

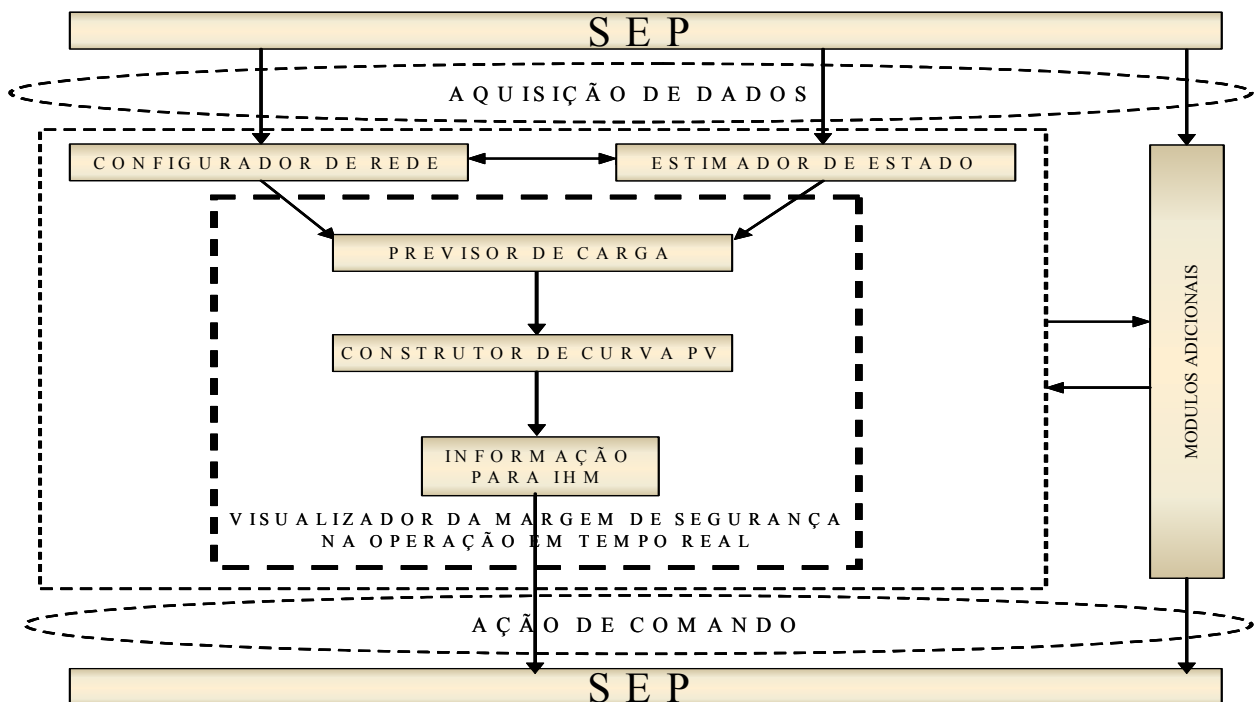


FIGURA 1 - Visualizador da Margem de Segurança na Operação em Tempo Real

Onde:

- Configurador de rede – determinar em tempo real a configuração da rede. Contém o status dos equipamentos e as características dos diversos componentes do SEP;
- Estimador de estado – determinar a melhor estimativa (a mais próxima possível dos valores reais) do estado do sistema (módulo e ângulo das tensões nas barras);
- Previsor de carga – com base no histórico e condição atual de operação fornecido pelo estimador de estado e configurador de rede, projeta as cargas a serem utilizadas no construtor de curva PV;
- Construtor de curva PV – a partir de ferramentas específicas de estudo de estabilidade de tensão traça a curva PV a ser disponibilizada ao operador do sistema;
- Informação para IHM – permite ao operador do sistema configurar a forma desejada de visualização da curva PV e ponto de operação.

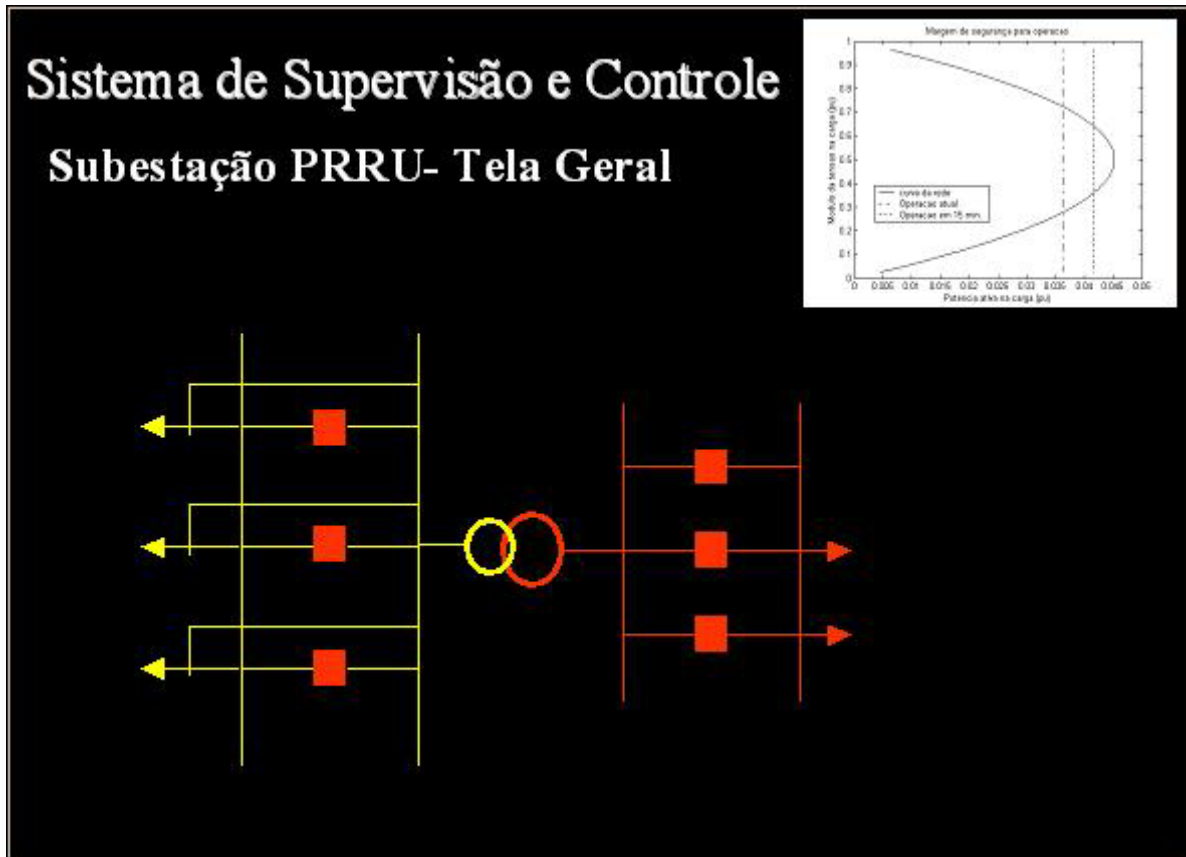


FIGURA 2 – Proposta de Layout da Tela Geral de Subestação com Monitoramento da Estabilidade de Tensão

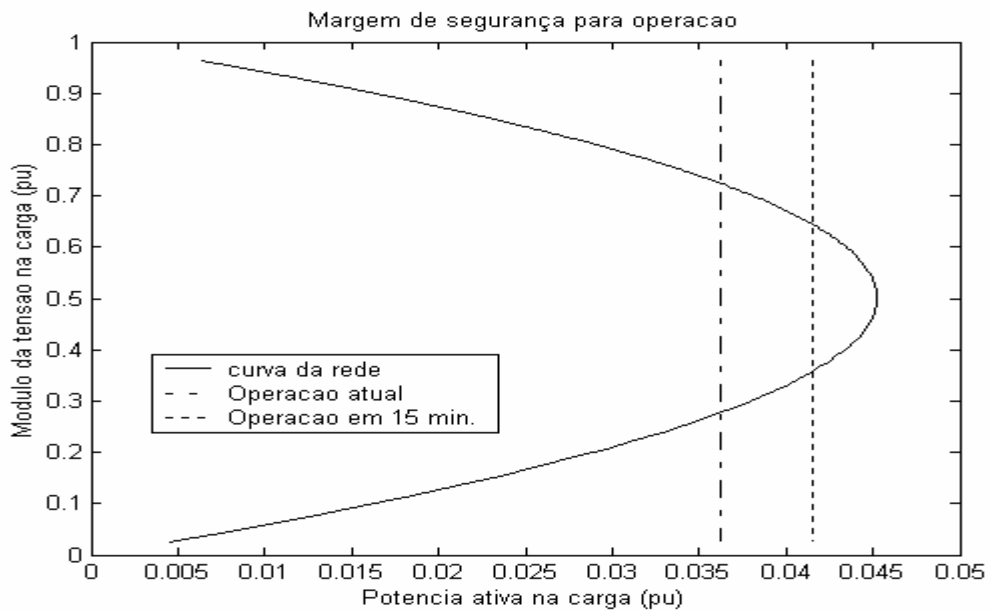


FIGURA 3 – Detalhe do Visualizador da Margem de Segurança na Operação em Tempo Real