

Um novo sistema computacional para análise de segurança em sistemas de energia elétrica

Raul A. Gerhardt¹

José Vicente Canto dos Santos²

Resumo

Na área de sistemas de energia elétrica, devido a sua importância, os problemas de análise de segurança e planejamento vêm sendo exaustivamente estudados nos últimos anos. O principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema computacional para análise de segurança estática em sistemas de energia elétrica que explora semelhanças entre os problemas de análise de segurança e de planejamento em sistemas de energia elétrica. Além disso, o sistema proposto incorpora elementos que procuram aumentar sua adequação ao uso real em companhias concessionárias de energia elétrica. Na revisão bibliográfica realizada, não foi encontrado relato de proposta semelhante. Para validar o sistema proposto, são apresentados resultados de testes realizados com diversas redes elétricas, incluindo um sistema real brasileiro de grande porte.

Palavras-chave: Sistemas de energia elétrica. Análise de segurança. Índice de performance.

Abstract

In the electrical energy systems area, the problems of security analysis and planning, have been intensively studied in the last years. The main objective of this work has been the developing of a computational system for static security analysis, that will explore likeness between the problems of security analysis and planning on electrical energy systems. Moreover, the considered system incorporates elements that they look to increase its adequacy to the real use in electrical utilities. The ample literature review achieved by the author has showed that no analogous proposal was found. To validate the proposed system, the results of tests made on several power systems were described, including a real life Brazilian system of large dimensions.

Keywords: *Electrical power systems. Security analysis. Performance index.*

¹ Mestre em Computação Aplicada do Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Computação Aplicada (PIPICA) – UNISINOS, CP 275, 93022-000, São Leopoldo – RS, Brasil. E-mail: <raul_rag@hotmail.com>

² Doutor em Engenharia Elétrica – Área de Automação. Professor da UNISINOS no PPG em Computação Aplicada (PIPICA) – UNISINOS, CP 275, 93022-000, São Leopoldo – RS, Brasil. E-mail: <jvcanto@unisininos.br>

1 Introdução

O problema de análise de segurança estática de sistemas de potência consiste em determinar o nível de importância que os diferentes equipamentos formadores de uma rede possuem para sua operação. Denomina-se contingência a saída de operação prevista ou imprevista de um ou mais equipamentos (linhas, transformadores, geradores, bancos de reatores/capacitores). Normalmente, os estudos de análise de contingência concentram-se mais em saídas de linhas e transformadores. Para saber o nível de gravidade para o sistema de cada uma das possíveis contingências, é necessário conhecer, se existir, o ponto de operação ao qual o sistema é levado pela ausência de um ramo e analisar os efeitos para a rede deste novo ponto de operação. No controle da operação de sistemas de potência, a execução da tarefa de seleção de contingências gera uma lista dos ramos do sistema, ordenada pelo nível de impacto causado ao sistema devido a cada contingência. Tal lista é então utilizada pela tarefa de análise de contingências, na qual o sistema é analisado com maior detalhamento para as contingências de maior gravidade.

O método considerado exato para seleção de contingências consiste na solução de um fluxo de carga (fluxo de potência) para a rede sem o ramo cuja saída de operação se deseja simular. Entretanto, mesmo com os recursos computacionais hoje existentes, a aplicação desse método é proibitiva devido às grandes dimensões dos sistemas de potência e às sérias restrições de tempo de execução das tarefas, impostas pelo controle da operação em tempo real. Devido a esse fato surge a necessidade de obtenção de métodos aproximados, porém confiáveis e eficientes para a solução do problema. A busca de métodos aproximados é facilitada pelo fato de a regra geral para os sistemas elétricos de potência ter a grande maioria das contingências e não trazer grandes problemas para a segurança do sistema. Com outras palavras, é pequeno o número de contingências que causam violações de limites ou grandes variações em relação ao ponto de operação inicial. As diferen-

tes filosofias de abordagem desse problema geram diferentes classes de métodos aproximados. Assim como em outras áreas da análise de sistemas de energia elétrica, o problema de seleção de contingências também pode ser subdividido em dois subproblemas: subproblema ativo e subproblema reativo. No contexto de verificação de segurança existe uma grande diferença na análise dos subproblemas ativo e reativo. O subproblema ativo tem modelagem simples com um número pequeno de variáveis. Já o subproblema reativo exige uma modelagem mais complexa e um número maior de variáveis associadas, o que aumenta o esforço computacional necessário para analisá-lo. Este é um dos motivos que fazem que a busca de métodos aproximados confiáveis para análise de segurança seja atualmente objeto de muitas pesquisas. Os dois aspectos das redes, ativo e reativo, são contemplados no presente trabalho. Um detalhamento extenso do problema pode ser visto em Canto dos Santos e Garcia, (1994).

Outro importante problema da área de sistemas de energia elétrica é o planejamento da expansão de sistemas de transmissão, conhecido simplesmente como problema de planejamento. Em sua solução, se tem como objetivo a determinação de onde, quando e quais equipamentos devem ser instalados em um sistema de potência para garantir, ao longo de um período e ao menor custo possível, o fornecimento adequado de energia elétrica aos consumidores. Na literatura especializada, o problema de planejamento vem sendo estudado desde a década de 1970, quando surgiram as primeiras propostas de solução, hoje conhecidas como heurísticas construtivas. Ultimamente, o problema de planejamento continua sendo tema de várias publicações, destacando-se artigos que utilizam abordagens de otimização combinatória, como as técnicas de *Simulated Annealing* e Busca Tabu.

O principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema computacional para análise de segurança estática em sistemas de energia elétrica que explore semelhanças entre os problemas de análise de segurança e

de planejamento em sistemas de energia elétrica. Na extensa revisão bibliográfica realizada, não foi encontrado relato de trabalho semelhante, por este motivo, acredita-se que exista ineditismo na proposta. Outros pontos importantes, na arquitetura do sistema proposto, são o tratamento de ilhamentos e a inclusão do cálculo de proximidade de colapso de tensão. Estes pontos possuem uma aplicabilidade prática bastante importante para companhias concessionárias de energia elétrica. Para validar o sistema proposto, são apresentados resultados de testes realizados com diversas redes elétricas, incluindo um sistema real brasileiro de grande porte. Após esta introdução, a seção 2 descreve a análise de segurança em sistemas de energia elétrica e revisa trabalhos relevantes sobre o tema e sobre o problema de planejamento da expansão da rede elétrica. A metodologia utilizada forma a seção 3. Seguem os testes e os resultados na seção 4, e a conclusão na seção 5. Alguns exemplos de trabalhos na área de planejamento estão em Monticelli *et al.* (1982) e Oliveira (2004).

2 Problema abordado

O problema de análise de segurança estática de sistemas de potência consiste em determinar o nível de importância que os diferentes equipamentos formadores de uma rede possuem para sua operação. É possível encontrar um vasto número de trabalhos na literatura, quando se considera o aspecto estático do problema, e alguns destes são revisados a seguir.

A chamada seleção (ou *screening*) de contingências é um procedimento utilizado antes da análise de contingências e consiste em calcular aproximadamente as condições de operação pós-contingência para uma lista de contingências previamente definida e classificá-las de acordo com algum critério, de modo que apenas as mais severas sejam submetidas à análise de contingências. Esta classificação é baseada nos índices de *performance*, os quais são computados para cada contingência e refletem a severidade das violações. Na prática, é comum adotar-se somente um nível para

a seleção de contingências antes da análise de contingências. O estado pós-contingência da rede na seleção de contingências é normalmente obtido através do cálculo de fluxo de carga pelo método desacoplado rápido. No caso da seleção visar somente à obtenção de violações de fluxo de potência em ramos, somente uma iteração ativa é realizada. No caso de se tentar obter as violações de tensão, uma iteração ativa e uma iteração reativa são realizadas (QUINTELA, 2002; DOTTA; DECKER; AGOSTINI; SOUZA, 2004; GRILO, 2005). A seleção de contingências normalmente é realizada somente para as contingências simples. As contingências múltiplas, em geral, não são submetidas ao processo de seleção de contingências, sendo analisadas diretamente através de um método detalhado. As contingências múltiplas a serem analisadas são escolhidas com rigor para a análise, normalmente são escolhidas as que são mais prováveis. O problema metodológico encontrado é a seleção das contingências mais críticas, a colocação de muitos casos na lista menor a ser analisada primeiramente, apesar de ser um método conservador, faz com que o tempo alocado para a análise de segurança seja maior. E quando ocorre o contrário, de a lista ficar muito pequena, problemas na rede podem deixar de ser detectados (GARCIA; ALMEIDA, 1999). O trabalho apresentado por Guerra (2002) desenvolve um método de seleção de contingências para violação de MW em linhas de transmissão e transformadores, utilizando abordagem multinível adaptativa que pode ser utilizada como uma ferramenta de auxílio ao operador na operação de sistemas elétricos de potência em tempo real, este trabalho é um exemplo da contribuição que métodos heurísticos podem trazer a solução do problema.

Após a seleção de contingências, normalmente procede-se à chamada Análise de Contingências, para conhecer em detalhes os efeitos para a rede daquelas contingências que permanecem no topo da lista gerada pela tarefa de *screening* (QUINTELA, 2002). Os limites operacionais normalmente levados em conta na análise de contingências são as sobrecargas em linhas de transmissão e transformadores

(MW) e sobre e subtensões em barramentos (GUERRA, 2002). Caso seja detectado o aparecimento de violações após a ocorrência de certa contingência, três tipos de atitudes podem ser tomadas pelo operador: a) desenvolver uma tarefa corretiva que será utilizada caso ocorra de fato a contingência; b) desenvolver uma estratégia preventiva e implementá-la imediatamente, de modo que a contingência passe a não provocar mais violações; c) nada fazer, já que a ocorrência de contingências é um fato pouco comum, e é mais provável que o estado de operação de rede mude antes que ocorra qualquer contingência (ALBUQUERQUE; CASTRO JUNIOR, 2003).

Em função da mudança das condições de operação das redes, o problema que se tornou particularmente importante foi o de estabilidade de tensão, ou seja, também é necessário considerar o aspecto dinâmico do problema. A instabilidade de tensão caracteriza-se por uma lenta variação do ponto de operação do sistema de modo que a magnitude de tensão na barra de carga decresce até um ponto em que não é possível reverter a situação através de ações de controle. Normalmente acontece em sistemas sobrecarregados e que terão sua demanda ainda mais aumentada. Também se costuma associar o evento ao suporte inadequado de potência reativa nos pontos em que se faz necessário (MANZONI; TARANTO; FALCÃO, 2000). Quintela (2002) aborda a avaliação de segurança de redes com relação à estabilidade de tensão, através do estudo e da implementação de índices de proximidade ao limite de estabilidade de tensão e avaliação do potencial de utilização desses índices no processo de seleção de contingências. Analisa-se a possibilidade de utilização da técnica em tempo real. A técnica utilizada investiga cada ramo do sistema exceto o da contingência simulada, calculando os índices de estabilidade de tensão que variam de 0 a 1. Utiliza-se apenas uma iteração do fluxo de carga e, caso alguma unidade geradora atinja seu limite de geração de potência reativa em decorrência da contingência em análise, somente mais uma iteração é realizada. A classificação das contingências é feita através dos índices

de *performance* formulados em função dos índices de proximidade ao limite de estabilidade de tensão. Amjady (AMJADY; ESMAILI, 2003), propôs uma avaliação da estabilidade de tensão na rede pré e pós-contingência utilizando duas técnicas. Esta avaliação tem a finalidade de prever prováveis pontos críticos na transmissão de energia em sistemas de potência. Albuquerque e Castro Junior (2003), em seu trabalho, defendem um método de classificação de contingências levando em consideração a estabilidade de tensão para ser utilizado nas salas de controle dos centros de operação em tempo real. As simulações do artigo mostram que é possível identificar corretamente as contingências mais críticas para um determinado ponto de operação. Árvore de decisão aproximada para análise de segurança e evolução é apresentada por Swarup, Mastakar e Reddy, (2005). As árvores de decisão são construídas *on-line*. No artigo de Swarup, Mastakar e Reddy (2005) a árvore de decisão é utilizada para classificação do estado do sistema de potência quanto a sua segurança/insegurança de operação.

Independentemente de qual aspecto do problema está sendo considerado, estático ou dinâmico, utiliza-se normalmente o conceito de Índice de *Performance* (IP), para a quantificação de efeitos de contingências. Uma formulação geral (CORTES; MENDEZ, 1999) é:

$$IP = \sum w_j | f_j(x) |^m \quad (2.1)$$

onde w_j é um peso relativo à função $f_j(x)$ e $f_j(x)$ é, em geral, a relação entre uma grandeza elétrica e seu limite em cada equipamento. A variável m é um número ao qual se eleva a função $f_j(x)$, normalmente elevada ao quadrado, no intuito de melhor diferenciar um caso que esteja carregado, mas não ultrapassando limites operativos de um caso que esteja realmente sobrecarregado. As contingências com os maiores valores de IP são consideradas as mais severas. Sabe-se também que, especialmente para redes de grande porte, a maioria das contingências acaba tendo um IP pequeno, ou seja, a ocorrência da maioria delas não resulta em violações ou em instabilidade de

tensão. Daí a importância de se evitar uma análise detalhada e demorada de casos sem nenhum impacto no que diz respeito à violação ou estabilidade de tensão. Na arquitetura clássica, o procedimento de seleção constitui no cálculo dos IP para cada contingência, e a ordenação na ordem decrescente. As linhas correspondentes ao topo da lista são, então, as candidatas a compor a lista menor a ser analisada detalhadamente pelo processo de análise de contingências. Alguns tipos de dificuldades são encontrados na classificação de contingências como, por exemplo, o mascaramento (*masking effect*) (GRILO, 2005). O mascaramento é a dificuldade de diferenciar uma contingência que resulta em outras pequenas violações de outra que resulta em uma grande violação.

Já no problema de planejamento, relembrando, se tem como objetivo a determinação de onde, quando e quais equipamentos devem ser instalados em um sistema de potência para garantir, ao longo de um período e ao menor custo possível, o fornecimento adequado de energia elétrica aos consumidores. Dentre os muitos métodos existentes para o problema de planejamento, destaca-se por sua relação com este trabalho o método do Mínimo Esforço. Este método baseia-se no fato de que a distribuição dos fluxos em uma rede é tal que a lei do mínimo esforço minimiza o produto das reatâncias (*p.u.*) de cada ramo pelo quadrado do respectivo fluxo. Esta função de mínimo esforço (2.2) é utilizada como um índice de sensibilidade para ordenar as adições de novos circuitos do sistema (OLIVEIRA, 2004).

$$IS_{me} = \Delta Z_{ij} = -\frac{1}{2}(\theta_i - \theta_j)^2 \Delta \gamma_{ij} \quad (2.2)$$

onde $\theta_i - \theta_j$ é a diferença angular do ramo ij antes da adição, e $\Delta \gamma_{ij}$ é a variação da susceptância de um circuito no ramo ij . A cada processo é adicionado um novo circuito que pode provocar o maior impacto na distribuição de fluxos na rede, o que apresenta o maior $|\Delta Z_{ij}|$. Outra peculiaridade do problema de planejamento é a possibilidade de existência de redes elétricas desconexas, precisamente porque se busca a expansão dos sistemas, na solução

do problema. Para tratar dessas desconexões, Monticelli *et al.* (1982) propuseram o conceito de rede fictícia, em 1982. Utilizando esta técnica, Canto dos Santos e Garcia (1998a) desenvolveram um tratamento de contingências que causam desconexões em sistemas elétricos de potência, também conhecidas como causadoras de ilhamentos. Esta utilização tem a intenção de analisar as redes desconexas sem um esforço computacional adicional elevado.

3 Sistema proposto

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um novo sistema computacional para análise de segurança em sistemas de energia elétrica. O sistema a ser desenvolvido busca avançar o estado da arte da tecnologia atualmente existente. A meta principal é partir de um sistema convencional de análise de segurança, baseado em cálculos de fluxo de potência, e desenvolver o novo sistema. A figura 1 mostra esquematicamente elementos que podem ser adicionados à arquitetura clássica. Na figura, vê-se a inclusão de exploração de semelhanças com o problema de planejamento, de técnicas heurísticas, de cálculo de colapso de tensão, de tratamento de ilhamentos e, ainda, de outras melhorias no sistema. Deve-se destacar a proposta de exploração de semelhanças com o problema de planejamento e a verificação de proximidade de colapso de tensão. A inclusão de tratamento para ilhamentos é, também, digna de destaque devido a sua utilidade para concessionárias de energia elétrica. A seguir são descritos os principais elementos mostrados na figura 1.

3.1 Exploração de semelhanças com o problema de planejamento

Na Seção anterior foi descrito o método do Mínimo Esforço, proposto por Monticelli *et al.* (1982), para o problema do planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica. Quando se compara o problema de planejamento com o problema considerado neste trabalho, percebe-se que existem várias semelhanças entre eles. Os principais pontos em comum são listados a seguir:

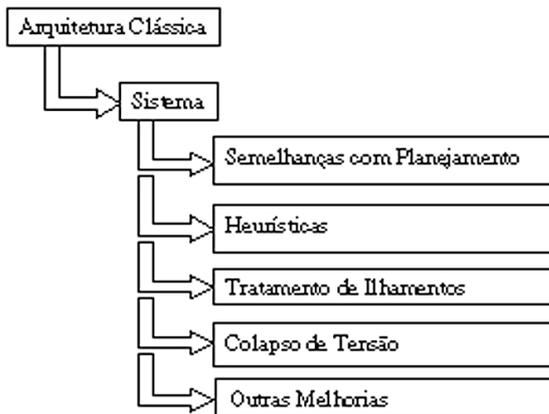


Figura 1 – Arquitetura do novo sistema de análise de segurança

- Em ambos os casos têm-se equipamentos fora de operação. A existência de partes fora de operação leva ao surgimento de redes elétricas desconexas, sendo esta a razão para a utilização de técnicas específicas de análise, pois, nos casos de redes desconexas, surgem matrizes singulares.

- Em ambos os casos, são conhecidos os recursos, isto é, os equipamentos disponíveis para utilização. Deve-se notar, entretanto, que, no caso da análise de segurança, as restrições referentes aos equipamentos são mais severas que no problema de planejamento, porque, no primeiro caso, não há possibilidade de instalar equipamentos novos nas redes.

- Em ambos os problemas, há possibilidade de utilização do modelo linearizado de cálculo de fluxo de potência (FCCC). No planejamento e no tratamento do aspecto ativo da análise de segurança não há necessidade de se conhecer todas as variáveis de estado da rede.

Pelos motivos acima expostos, a exploração de semelhanças entre os dois problemas, será buscada neste trabalho. Especificamente, será pesquisada a ordenação de contingências através do método do mínimo esforço, originalmente proposto para o problema de planejamento. A filosofia que embasa esta ideia é o fato de que em ambos os problemas, redes elétricas são alteradas: no planejamento pelo acréscimo de elementos e na análise de segurança pela saída de operação destes. Acredita-se que o sistema a ser desenvolvido terá elevada eficácia computacional, devido às características próprias do método do mínimo esforço.

3.2 Tratamento de ilhamentos

Canto dos Santos e Garcia (1998) utilizaram-se do modelo desenvolvido por Monticelli sobre redes fictícias que sobrepõe ramos fictícios com alto valor de impedância aos ramos originais do sistema. Este método faz com que ilhamentos possam ser analisados sem depender de um esforço computacional adicional extremo. Após a aplicação desta rede fictícia, são implementadas técnicas para explorar a esparsidade das matrizes envolvidas no processo de obtenção da solução (desenvolvida por Zollenkopf e Tinney (Cortes e Mendez, 1999)) e as contingências simples e múltiplas são simuladas via método de compensação. Destaca-se que este ponto estabelece um importante diferencial sobre sistemas de análise de segurança convencionais. Nestas abordagens, casos que causam ilhamentos são simplesmente qualificados como graves, por este motivo topológico. Todos estes casos têm, portanto, o mesmo nível de gravidade para o sistema elétrico, o que não corresponde à realidade. O motivo para isto é a impossibilidade de análise pelos métodos convencionais devido à singularidade de matrizes envolvidas em soluções do tipo $Ax = b$, quando ilhamentos ocorrem. A figura 2 mostra esquematicamente um caso de ilhamento (trecho radial de um sistema).

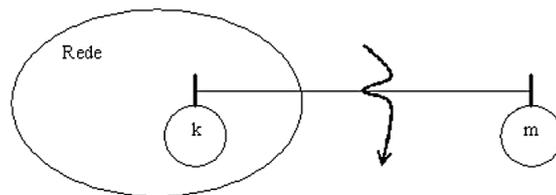


Figura 2 – Situação de ilhamento

Ainda para a inclusão de análise de casos de ilhamentos, o método FCCC alternativo, proposto em Canto dos Santos e Garcia (1998b), poderia ter sua aplicação investigada neste trabalho. Neste método, um modelo alternativo para o fluxo de potência linearizado foi apresentado. Nesse novo modelo a potência ativa de todos os geradores é incógnita, e, de maneira muito simples, o conjunto de geradores adequado ao atendimento da carga do sistema é determinado. O método pode substituir ou

então fornecer uma excelente solução inicial para o despacho de potência ativa sem a realização de cálculos de otimização. Uma vez que contém referência distribuída, casos de ilha-mento são facilmente analisados desde que em cada ilha física do sistema exista um gerador.

3.3 Verificação de colapso de tensão

Outro aliado na análise da sensibilidade a ser utilizado é o trabalho de Quintela (2002) que aborda a avaliação de segurança de redes com relação à estabilidade de tensão, através de estudo e implementação de índices de proximidade ao limite de estabilidade de tensão e avaliação do potencial de utilização dos mesmos no processo de seleção de contingências. A principal motivação do trabalho de Quintela consiste no fato de que, para redes de grande porte, o número de contingências a ser avaliado torna-se impraticável durante o ciclo de operação, sendo imprescindível selecionar apenas as contingências que realmente necessitam de um estudo mais detalhado. O sistema da figura 1 prevê a agregação de informações referentes à possibilidade de colapso de tensão, obtidas a partir do método de Quintela (2002), ao sistema a ser desenvolvido. Este fato não é comum e trata-se de algo desejado por companhias concessionárias de energia elétrica.

3.4 Uso de heurísticas

O trabalho de Guerra (2002) apresenta contribuições para o desenvolvimento de um método de seleção de contingências para violação de limites operativos para fluxos de potência ativa (MW) em linhas de transmissão e transformadores, utilizando abordagem multinível adaptativa que pode ser utilizada como uma ferramenta de auxílio ao operador de sistemas elétricos. Propõe-se que se investigue a utilização destas heurísticas visando, principalmente, acelerar o processo de análise de segurança.

3.5 Outras melhorias

Conforme visto anteriormente, a classificação de contingências é realizada com base

no cálculo dos chamados índices de *performance* (PI). Sabe-se também que, especialmente para redes de grande porte, a maioria das contingências costuma ter um IP de pequeno valor, ou seja, a ocorrência da maioria delas não resulta em violações nos limites operativos das redes analisadas. Daí a importância de se evitar uma análise detalhada e demorada de casos sem nenhum impacto no que diz respeito à operação do sistema. A busca de uma formulação e, especificamente, de expoentes para índices de *performance* capazes de suprir seletividade para o sistema de análise de segurança desenvolvido também poderia ser realizada. Os subsídios para esta busca encontram-se descritos em Canto dos Santos e Garcia (1994).

Sabe-se que a análise do perfil de injeções reativas em barras tipo PV e V θ deve ser incluída na quantificação dos efeitos das contingências. Esta é uma primeira abordagem para considerar a presença de barras com tensão constante na análise de segurança. O método 1P-1Q alternativo (CANTO DOS SANTOS; GARCIA, 1994) consiste numa segunda abordagem para este problema. Nos métodos de análise de segurança já discutidos, as barras modeladas como tipo PV são assim consideradas de maneira constante, inclusive na simulação de contingências. Considera-se que pode ser questionada a hipótese de que a tensão nessas barras não sofra efeito de contingências nos sistemas. A abordagem do método 1P-1Q alternativo para enfrentar o problema de modelagem de barras PV na análise de segurança é bastante simples. Conhecido o caso base da rede através do cálculo de fluxo de carga, as barras tipo PV são convertidas para tipo PQ. A injeção de potência ativa especificada não é alterada, e a injeção de potência reativa especificada para as novas barras PQ é a injeção de potência reativa do caso base da rede. Não são alterados os tipos das demais barras do sistema, permanecendo como tipo V θ ou tipo PQ. Após é executado o método 1P-1Q já descrito neste trabalho. Aplicando este método para análise de segurança, considera-se que os sistemas analisados só possuem barras tipo V θ

e PQ. Assim a avaliação dos efeitos das contingências é feita exclusivamente no perfil de tensões. Isto simplifica a análise dos resultados, pois formam apenas uma lista ordenada de contingências. A viabilidade de aplicação do método 1P-1Q alternativo em um sistema real de análise de segurança, destinado a analisar redes elétricas de grande porte, também pode ser investigada.

4 Experimentos realizados

O sistema proposto na figura 1 está em implantação atualmente. Neste trabalho, são apresentados resultados de testes realizados com os módulos já construídos: Semelhanças com Planejamento e Tratamento de Ilhamentos. O *hardware* utilizado foi um *Pentium III*, 600 Mhz, com 256 Mb de memória. O sistema operacional utilizado foi o *Microsoft Windows 2000 Professional*. Os *softwares* ANAREDE – (CEPEL, 2004) e o *software* de análise de segurança, Programa de Análise de Contingências, desenvolvido no âmbito PIPCA / UNISINOS também foram utilizados. O banco de dados *Oracle 10g* foi utilizado para ler e gerar informações dos dados de entrada e saída, bem como organizá-los para poderem ser utilizados como informação.

4.1 Sistema de 30 barras

Este sistema teste, abreviado como IEEE-30, a exemplo do sistema IEEE-14, é bastante conhecido (FRERIS; SASSON, 1968) e, devido às suas dimensões, adequado para a descrição de resultados. A rede possui 30 barras, sendo 2 de geração e 41 ramos. A tabela 1 mostra os índices de severidade de fluxo de potência (ISfl), índice de severidade de tensão (ISv), índice de severidade da potência reativa (ISMvar) e o índice de severidade do mínimo esforço (ISme). Os três primeiros fornecidos pelo ANAREDE, e o quarto calculado pela expressão 3.2.

Na figura 3, observa-se a variação dos índices de severidade do ANAREDE frente

Tabela 1 – Resultados para o sistema de 30 barras

Contingência	ISfl	ISv	ISMvar	ISme
1	0,00	0,00	0,00	21.263,50
2	11,50	0,00	0,00	290.106,54
3	6,10	0,00	0,00	70.308,00
4	11,30	0,00	0,00	1,90
5	0,00	0,00	0,00	133.416,24
6	7,70	0,00	0,00	88.100,00
7	7,70	0,00	0,00	206,50
8	5,00	0,00	0,00	92,80
9	4,90	0,00	0,00	589,68
10	6,50	0,00	0,00	170,10
11	5,30	0,00	0,00	15.010,38
12	4,90	0,00	0,00	90.322,20
13	0,00	0,00	0,00	0,00
14	6,20	0,00	0,00	1.985,50
15	10,70	0,00	0,00	44.556,80
16	0,00	0,00	0,00	0,00
17	4,70	0,00	0,00	1.279,00
18	6,00	0,00	0,00	788,32
19	0,00	0,00	0,00	486,82
20	0,00	0,00	0,00	9,98
21	0,00	0,00	0,00	86,49
22	0,00	0,00	0,00	535,33
23	0,00	0,00	0,00	25,82
24	5,70	0,00	0,00	30,60
25	6,80	0,00	0,00	846,05
26	5,50	0,00	0,00	16,88
27	4,90	0,00	0,00	93,50
28	5,80	0,00	0,00	187,38
29	4,60	0,00	0,00	0,00
30	6,00	0,00	0,00	90,90
31	5,50	0,00	0,00	35,78
32	4,70	0,00	0,00	13,50
33	5,80	0,00	0,00	1.332,86
34	0,00	0,00	0,00	475,00
35	4,80	0,00	0,00	844,83
36	11,50	417,60	0,00	31.680,00
37	6,50	5,00	0,00	2.076,00
38	6,90	62,40	0,00	6.779,25
39	5,80	0,00	0,00	566,63
40	4,80	0,00	0,00	90,00
41	0,00	0,00	0,00	107,64

aos resultados do índice de severidade do mínimo esforço. Verifica-se que, nos pontos onde ocorre maior variação do ISfl, o ISme

também gera grandes índices de variação. O índice de severidade do mínimo esforço é sensibilizado pela variação do ISv, contudo, em função das demais variações do sistema, apresenta outras variações não geradas pela variação da tensão. Conforme a mesma figura, com os parâmetros utilizados, o índice ISmvar foi nulo para todos os casos. Observa-se que o índice de severidade do mínimo esforço acompanha em mais de 70% dos casos de maior violação de ISfl e que acompanha 100% dos casos de violação de ISv. Dessa forma, acredita-se que a técnica do mínimo esforço auxilia na detecção dos casos de contingência mais graves, importantes na análise de segurança para sistemas de grande porte.

O *software* ANAREDE, ao realizar os cálculos para contingências simples determina a separação física da rede em três pontos: as contingências 13 (ramo 9-11), 16 (ramo 12-13) e 34 (ramo 25-26). Os resultados encontrados para o Tratamento de Ilhamentos estão na tabela 2. Visualiza-se que o cálculo do índice de severidade do fluxo de potência foi possível e que as contingências possuem índice de violação de fluxo diferenciado, permitindo a diferenciação entre cada ilhamento.

Tabela 2 – Contingências tratadas pela técnica de ilhamento

Contingência	ISfl
13	5.1
16	4.7
34	4.4

4.2 Sistema real de 3425 barras

Este sistema real brasileiro de 3425 barras, 4849 ramos e todas as características de um sistema real de grande porte, tais como diversos níveis de tensão no sistema, ramos que foram obtidos com cálculo de equivalentes e presença de *jumpers*, é o sistema escolhido para realizar os testes para os cálculos do mínimo esforço. A simulação das contingências em um sistema complexo deste porte viabiliza a visualização do comportamento dos índices de severidade do mínimo esforço frente aos índices de severidade do fluxo de potência dos índices de severidade de tensão e dos índices de severidade de geração reativa. De forma geral os resultados foram semelhantes àqueles obtidos para o sistema IEEE-30. Dadas às dimensões do sistema, optou-se pela apresentação dos resultados somente na forma gráfica. A figura 4 mostra os índices obtidos, para as contingências que apresentaram os 100 maiores valores de ISme. A tabela 3 mostra os primeiros 10 casos de separação física da rede, ordenados graças ao Tratamento de Ilhamentos. Esses cálculos permitem verificar e definir qual ilhamento é mais significativo. Um ilhamento em uma cidade do interior terá violações de fluxo diferentes de uma cidade da região metropolitana ou de uma capital de Estado. Pode-se verificar que o cálculo do índice de severidade do mínimo esforço e a técnica de ilhamento podem contribuir para análise de segurança da rede. Outro fato importante é a redução do tempo computacional obtido com o índice ISme.

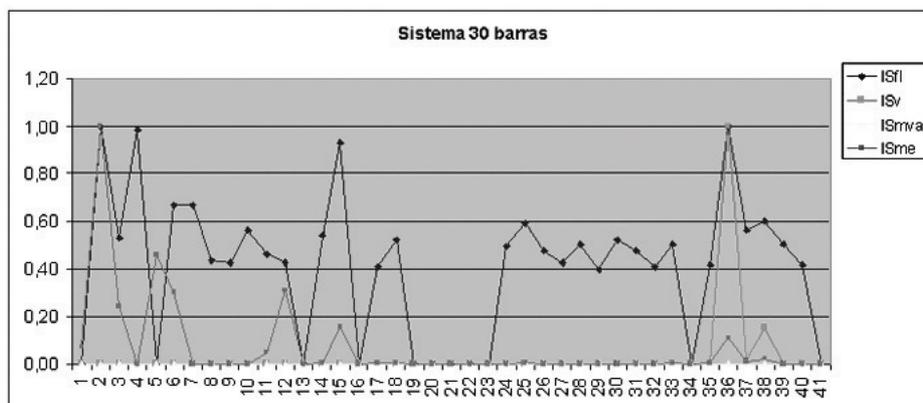


Figura 3 – Resultados para o sistema de 30 barras

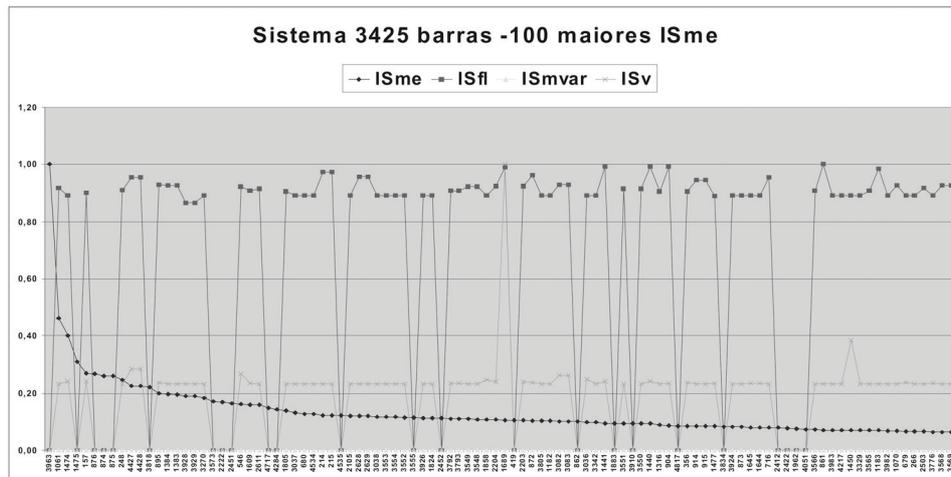


Figura 4 – Resultados para o sistema real de 3425 barras

Tabela 3 – Dez casos de ilhamento tratados

Caso	3801	1053	120	1066	1197	1198	1204	1213	1227	1267
ISfl	71,80	67,70	67,60	67,60	67,60	67,60	67,60	67,60	67,60	67,60

5 Conclusão

O principal objetivo deste trabalho foi a proposta de um novo sistema computacional para análise de segurança estática em sistemas de energia elétrica que explora semelhanças entre os problemas de análise de segurança e os de planejamento em sistemas de energia elétrica. Na extensa revisão bibliográfica realizada, não foi encontrado relato de proposta semelhante.

Até o momento, foram testados o método do mínimo esforço, originalmente aplicado ao problema de planejamento, e a técnica para ilhamentos. Ambos os métodos foram aplicados a dois sistemas, o sistema testes IEEE de 30 barras e outro sistema real de 3425 barras. No método do mínimo esforço, através de cálculos e comparativos com o método tradicional, constatou-se que o mesmo é capaz de verificar as contingências com maiores índices de sensibilidade (ISfl, ISv, ISmvar), ou seja, pode-se avaliar a possibilidade de usar o ISme em substituição aos índices de sensibilidade ISfl, ISv e ISmvar. Em ambos os sistemas, o de 30 barras e o de 3425 barras, esse fato foi comprovado. No método para ilhamentos, verifica-se que a adição de um ramo

fictício, com uma reatância bastante superior e proporcional ao ramo original, permite realizar o cálculo do fluxo de potência inviável até a aplicação deste método. O cálculo permite diferenciar, através dos índices de sensibilidade de violações de fluxo, a magnitude de cada ilhamento.

Em trabalhos futuros, serão publicados os resultados obtidos com os demais elementos do sistema proposto. Pode-se prever também a continuidade do desenvolvimento da pesquisa na área de análise de segurança em redes elétricas. Algumas atividades possíveis são a utilização de processamento distribuído, a consideração de outros métodos de cálculo de fluxo de potência e a integração do sistema desenvolvido com outras tarefas de análise de redes elétricas.

Referências

ALBUQUERQUE, Mário de A.; CASTRO JUNIOR, Carlos Alberto de. Seleção de contingências com relação à estabilidade de tensão para análise de segurança em tempo real. *In: SIMPASE – SIMPÓSIO DE AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS*, 5, 2003. **Anais...** Rio de Janeiro: Cigré Brasil, 2003.

- AMJADY, Nima; ESMAILI, Masoud. Voltage security assessment and vulnerable bus ranking of power systems. **Electric Power System Research**, v. 64, n. 3, p. 227-237, march 2003.
- CANTO DOS SANTOS, J. V.; GARCIA, Ariovaldo V. Um estudo sobre critérios de seleção de contingências no subproblema reativo da análise de segurança estática de sistemas de potência. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 10 – CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CONTROLE AUTOMÁTICO, 6, 1994, Rio de Janeiro. **Anais...** Brasília, DF: Sociedade Brasileira de Automação, 1994.
- CANTO DOS SANTOS, J. V.; GARCIA, A. V. Tratamiento de contingencias que causan desconexiones em sistemas electricos de potencia. **Información Tecnológica**, v. 9, n. 6, 1998.
- CANTO DOS SANTOS, J. V.; GARCIA, Ariovaldo V. Um modelo alternativo para o cálculo de fluxo de potência linearizado. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 12, 1998, Uberlândia. **Anais...** Brasília, DF, Sociedade Brasileira de Automação, 1998.
- CEPEL – **ANAREDE V08/Ago04: manual do usuário**. Rio de Janeiro: CEPEL, 2004.
- CORTES, Omar A. C.; MENDEZ, Osvaldo R. S. determinação do ranking de contingências em sistemas de energia elétrica utilizando MPI. *In*: SECICOM, 1999, Lavras, **INFO-COMP Journal of Computer Science**, v. 1, p. 1-9, 1999.
- DOTTA, D.; DECKER, I. C.; AGOSTINI, M. N.; SOUZA, A.. Modelagem orientada a objetos para a análise de segurança dinâmica. *In*: SEPOSE, 9, 2004, Rio de Janeiro, **Anais...** Rio de Janeiro, 2004.
- FRERIS, L.; SASSON, A. Investigation of the load flow problem. **IEEE**, v. 115, n. 10, p. 1459-1470, outubro de 1968.
- GARCIA, Ariovaldo V.; ALMEIDA, Madson C de. Identificação de ramos críticos para estabilidade de tensão baseada na análise modal do sistema. *In*: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 15, 1999, Foz do Iguaçu, PR. **Anais...** p. 1-6, 1999.
- GRILO, Ahda P. **Um método baseado em lógica nebulosa para classificação de contingências em redes de energia elétrica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, 2005.
- GUERRA, Antônio Fernandes. **Seleção de contingências para violação de mw em ramos de sistemas elétricos de potência utilizando abordagem multinível adaptativa**. 2002. Dissertação: (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Campinas, SP, 2002. Disponível em <<http://libdigi.unicamp.br/document>>.
- MANZONI, Alessandro; TARANTO, Glauco N.; FALCÃO, Djalma M. **FASTSIM Simulação de média e longa duração para estudos de controle e estabilidade de tensão...** Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Elétrica e NACAD, 2000. Disponível em <<http://www.coep.ufrj.br>>.
- MONTICELLI, A.; SANTOS, A.; PEREIRA, M.; CUNHA, S., PARKER, B., PRAÇA, J. Interactive transmission network planning using a least-effort criterion. **IEEE Transactions on PAS**, v. 101, n. 10, p. 3919-3925, october 1982.
- OLIVEIRA, Sérgio Azevedo de, **Metaheurísticas aplicadas ao planejamento da expansão da transmissão de energia elétrica em ambiente de processamento distribuído**. Tese (Doutorado Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, 2004. Disponível em <<http://libdigi.unicamp.br/document>>.
- QUINTELA, Adriana S. **Estudo de índices de proximidade ao limite de estabilidade de tensão e aplicação na seleção de contingências**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – Universidade Estadual de Campinas, 2002.

SWARUP, K. S.; MASTAKAR, Rupesh; REDDY, K. V. P. Decision Tree for Steady State Security Assessment and Evaluation of Power Systems. ICISIP, 2005, Bangalore, India. **Proceedings...** Bangalore, India: p. 211-216, 2005.