



**GRUPO IV
GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT**

**AVALIAÇÃO DA ADEQUAÇÃO E APLICABILIDADE DA FERRAMENTA VSAT
AO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO PARA ESTUDOS “OFF-LINE”**

Marcelos G. dos Santos*
ONS

Venilton Rodrigues

Ricardo B. Prada

Leonardo X. da Silva
PUC-Rio

RESUMO

Este artigo relata a experiência do Operador Nacional do Sistema Elétrico com a ferramenta computacional VSAT - *Voltage Security Assessment Tool*. Esta ferramenta pretende calcular o limite de segurança de tensão com base em certos critérios, uma lista de eventos críticos, bem como medidas para reduzir o efeito dos problemas de segurança de tensão e, se possível, eliminá-los. Foi estudada a viabilidade de utilização da ferramenta off-line, isto é, foi verificado se a ferramenta se adequaria ao sistema elétrico brasileiro e se seria capaz de auxiliar o planejamento da operação. Como não podia deixar de ser, foram constatados pontos favoráveis e desfavoráveis na ferramenta a serem descritos no artigo.

PALAVRAS-CHAVE

Segurança de tensão, estabilidade de tensão, máximo fluxo de potência transmitido, máximo carregamento, controle preventivo e corretivo.

1.0 - INTRODUÇÃO

O objetivo da avaliação do carregamento das redes de transmissão e da estabilidade do controle de tensão é determinar se o ponto de operação pertence ou não à parte superior da curva P,Q x V (região de operação normal) e a “distância” até o ponto de operação correspondente ao máximo fluxo de potência que pode ser transmitido à carga.

A avaliação e manutenção da segurança de tensão são relevantes aspectos do planejamento da operação e da operação do sistema elétrico em si.

Uma necessidade já claramente identificada é a de uma ferramenta computacional para auxiliar e dar suporte aos operadores. Sendo assim este artigo relata a experiência obtida com uma ferramenta testada para cobrir esta necessidade.

A ferramenta avaliada é licenciada pela B. C. Hydro do Canadá, sendo comercializada com o nome de Voltage Security Assessment Tool - VSAT.

2.0 - A FERRAMENTA VSAT

Esta ferramenta se dispõe, através das condições reais do sistema elétrico, a calcular os limites de segurança de tensão, com base em critérios de tensão e margem de potência, e uma lista de eventos críticos. O VSAT também identifica medidas preventivas e corretivas para mitigar, e se possível eliminar, os problemas de segurança de tensão.

Em [1,2] é apresentada uma descrição das características da ferramenta segundo o próprio desenvolvedor. Segundo este, para um ponto de operação determinado de um sistema de potência *on-line* (fornecido pelo Estimador de Estado) ou qualquer outro estado do sistema (estado futuro ou no modo de estudo), o VSAT:

- determina se o sistema permanece seguro quanto à tensão no evento de qualquer contingência,
- determina o limite de segurança de qualquer transferência de potência específica no sistema,
- identifica as contingências críticas e o tipo e localização das inseguranças,
- determina a melhor (mais efetiva) ação de controle corretivas para levar um ponto de operação inseguro para um estado seguro.

* Rua da Quitanda, 196 - 11º andar - CEP 20091-000 – Rio de Janeiro - RJ - BRASIL
Tel.: (021) 2203-9814 - Fax: (031) 2203-9411 - E-MAIL: marcelos@ons.org.br

Na Figura 1 é mostrada a tela principal da ferramenta.

A principal técnica computacional para a avaliação da segurança de tensão é a solução do fluxo de potência CA com o Método Desacoplado Rápido (FDPF). A existência da solução do fluxo de potência indica a segurança de tensão do sistema de potência, levando em consideração a capacidade de VAR dos geradores, ações e limites dos dispositivos de controle, modelos de carga, etc. representadas corretamente. Com a redução de passo automática, o FDPF é capaz de alcançar o “nariz” da curva PV sem dificuldades numéricas.

Ao contrário de algumas outras ferramentas que calculam uma curva PV pós-contingência pelo incremento de carga / geração depois que a contingência é aplicada no ponto base (usando o Fluxo de Potência Continuado ou métodos convencionais), o VSAT traça a curva PV pré-contingência (considerando apropriadamente ações de controle manuais e automáticas) e então aplica as contingências em cada acréscimo de carga para determinar se esse ponto é seguro ou não.

A seleção de Ações de Controle está baseada na sensibilidade da(s) violação(ões) de segurança para cada controle. As sensibilidades são calculadas das matrizes Jacobianas de pré- e pós-contingência.

O VSAT apresenta ainda a capacidade de filtrar e selecionar de uma grande lista de contingências as mais severas, que serão consideradas na avaliação da segurança.

Esta ferramenta avalia a segurança de tensão com base em vários critérios.

- o sistema tem que permanecer seguro quanto à tensão no evento de qualquer contingência (principal critério), ou em outras palavras, o algoritmo de fluxo de potência tem que convergir;
- o sistema tem que ter uma determinada margem para a insegurança, isto é, tem que permanecer a uma certa distância do ponto crítico;

- as tensões de barra pré- e pós-contingência têm que permanecer dentro de limites especificados (faixa operativa e/ou variação máxima);
- as reservas de VAR pré- e pós-contingência de fontes selecionadas têm que permanecer dentro de limites especificados;
- os carregamentos de pré- e pós-contingência de linhas e transformadores têm que permanecer abaixo de seus limites térmicos.

As ações de controle são selecionadas de uma lista especificada de controles disponíveis, como chaveamento de reatores e capacitores, ajuste da tensão de geradores, ajuste de tap em transformadores, corte de carga, etc., com base na prioridade especificada para cada grupo de dispositivos. O VSAT determina inicialmente a melhor ação preventiva (pré-contingência) considerando todas as contingências e todas as violações de segurança. Se esta ação não pode prevenir contra insegurança para algumas contingências, o VSAT determina então a melhor ação corretiva (pós-contingência) para cada uma destas contingências.

Na ferramenta, todos os modelos convencionais e avançados de dispositivos e controles são incluídos no algoritmo de fluxo de potência, incluindo HVDC, FACTS, curvas de capacidade dos geradores.

Os modelos de carga pós-contingência podem ser qualquer combinação de potência, corrente ou impedância constante ou qualquer função exponencial de tensão. Cada contingência pode incluir saídas múltiplas de linhas, geradores, cargas, *shunts*, etc.

As respostas do regulador de velocidade e do CAG são fornecidas para a solução de contingências.

O VSAT pode trabalhar com sistemas de até 32000 barras e são aceitos dados de fluxo de potência nos formatos PTI, IEEE, BPA e outros. Infelizmente este outros não inclui o formato de dados do CEPEL (ANAREDE).

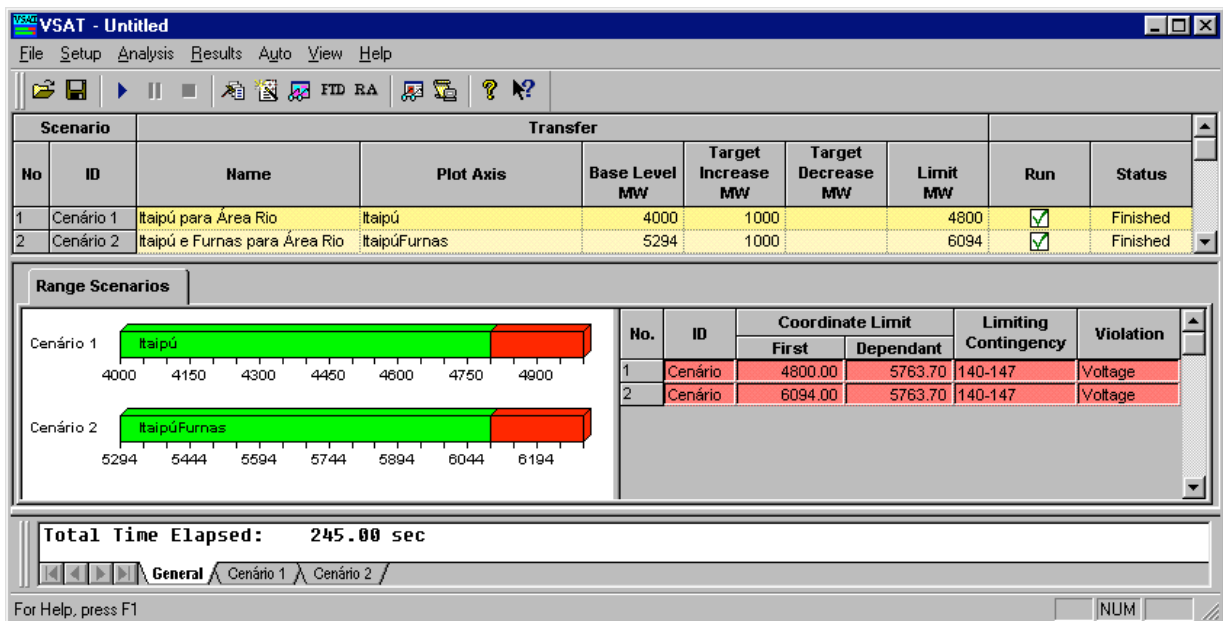


FIGURA 1 - Tela principal do VSAT

3.0 - CONVERSOR DE DADOS ANAREDE/PSF-ASCII

Como o VSAT não aceita o formato do CEPEL foi criado um conversor de dados do formato ANAREDE para um dos formatos utilizados pelo VSAT, o formato PSF ASCII. Este conversor foi desenvolvido em Visual Basic. A Figura 2 apresenta a interface deste conversor.

O conversor cria 10 (dez) dos cartões de entrada do formato PSF ASCII sendo eles:

- BUS DATA: com os dados de tensão (módulo e ângulo) para todas as barras;
- GENERATOR DATA: com os dados de todos os geradores sendo que os limites de potência ativa e reativa estão abertos (0 e 9999 para potência ativa e, -9999 e 9999 para potência reativa);
- LOAD DATA: com os dados de todas as cargas;
- FIXED SHUNT DATA: com os dados dos shunts fixos (valores das colunas 66 à 70 do cartão DBAR do ANAREDE);
- LINE DATA: com os dados de linha;
- FIXED TRANSFORMER DATA: com os dados de transformadores fixos;
- ULTC TRANSFORMER DATA: com os dados de LTCs;
- FIXED SERIES COMPENSATOR DATA: com os dados apenas dos reatores de linha do ANAREDE;
- AREA INTERCHANGE DATA: com os dados de área;
- ZONE DATA: com os dados de zona. Estes estão sendo tomados iguais aos de área.

4.0 - MARGEM DE POTÊNCIA E CONTINGÊNCIAS

Existe no VSAT uma relação intrínseca entre margem e contingências. Para que uma possa ser analisada a outra deve existir [3]. Ou seja, mesmo quando não é necessária a aplicação de contingências para a análise, esta deve ser ativada para que a margem de potência, ou seja, a mínima distância que é desejável se manter do ponto crítico, seja checada.

Para que o VSAT realize a análise de contingências, além dos parâmetros relacionados às contingências, é necessária a existência do arquivo com as margens, mesmo que nenhuma margem seja definida.

4.1 Aplicação da margem de potência e das contingências durante o cálculo do limite de transferência

4.1.1 Margem de carga

Para auxiliar a compreensão deste item, a Figura 3 ilustra a aplicação de uma contingência e da margem, durante o cálculo do limite de transferência de potência.

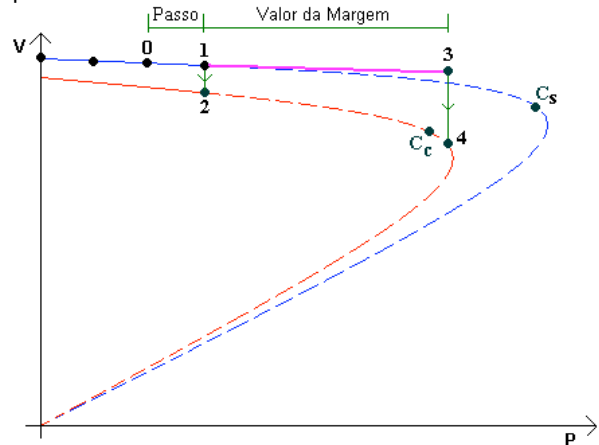


FIGURA 3 - Aplicação de contingências e da margem de potência

A cada ponto ou passo do cálculo do limite de transferência, todas as contingências selecionadas são aplicadas, uma a uma seguindo a ordem de severidade definida na fase de seleção, ou seja, da mais severa para a menos severa. Se uma contingência causar violação de critérios ou divergir, o ponto é inseguro.

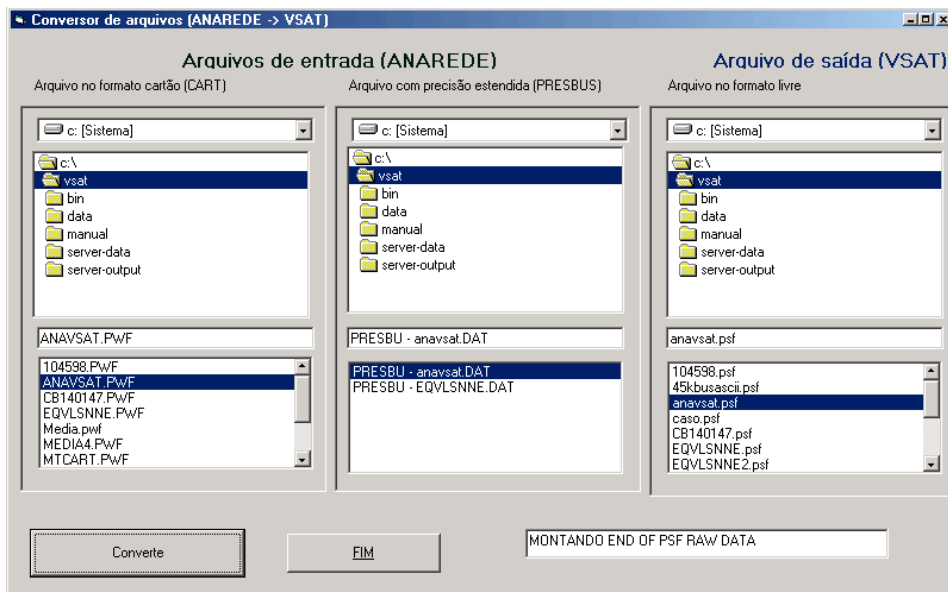


FIGURA 2 - Conversor de dados

Após a aplicação das contingências o ponto é levado novamente ao valor original (sem contingências) e então é aplicada a margem levando a um outro ponto de operação e, sendo este seguro, novamente são aplicadas as contingências.

Para o exemplo da Figura 3 existe apenas uma contingência. Os Pontos C_s e C_c são os pontos críticos para os casos sem e com contingência, respectivamente.

O Ponto de Operação 0 é um ponto seguro e, prosseguindo a análise, é realizado um aumento (passo) de carga chegando-se ao Ponto de Operação 1 que é o ponto em análise.

Após verificar-se a convergência e a não violação de nenhum critério no Ponto 1, é aplicada a contingência levando o sistema para o Ponto 2. Neste ponto também não há violação de critérios e existe solução do fluxo de carga. De posse desta informação, retorna-se ao Ponto 1 e é aplicada a margem levando o sistema ao Ponto 3, onde novamente são verificadas a convergência e a não violação de critérios. Sendo seguro o Ponto 3, é aplicada a contingência levando o sistema ao Ponto 4. Neste ponto o fluxo de potência não tem solução, assim o ponto em análise (Ponto 1) é dito inseguro e o Ponto 0 é apresentado como limite de transferência de potência.

4.1.2 Margem de geração

A margem de geração é utilizada para se definir um conjunto de unidades geradoras responsável por suprir a margem de carga. Quando ela não é definida, a barra *swing* do sistema assume este aumento de carga.

A margem de geração pode ser usada também para se fazer um redespacho de geração. Para tanto, no arquivo da margem basta definir, pelo menos, dois grupos de margem de geração, um com margem negativa e outro com margem positiva.

5.0 MÉTODOS DE CLASSIFICAÇÃO E DE SELEÇÃO DE CONTINGÊNCIAS

5.1 Método de Classificação

Quando a seleção de contingências é iniciada, o primeiro passo é classificar as contingências em ordem de severidade. Para isto, é calculada a solução do fluxo de potência para o caso base, e em seguida, a carga definida pela direção de transferência é aumentada, mantendo constante a geração que responderá à variação desta carga. Este acréscimo inicial de carga é atendido pela geração da barra *swing*. Tomando este caso base estressado como um novo caso base, ele realiza o cálculo do limite de transferência de potência. Não se sabe a razão por que isso é feito. Também não se sabe como é calculado esse incremento inicial de carga. Também não se sabe por que é utilizada a geração da barra *swing*.

No ponto do limite de transferência de potência calculado são aplicadas todas as contingências e estas são classificadas em ordem de severidade conforme o critério apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Critério de classificação em ordem de severidade

Fluxo de Potência	Mais severa	Severidade intermediária	Menos severa
Divergente	Menor número de iterações	--	Maior número de iterações
Convergente	Violou critérios de tensão	Violou critérios de reserva de potência reativa	Violou margem de potência
	Maior <i>mismatch</i>	--	Menor <i>mismatch</i>

A severidade na Tabela 1 deve ser considerada em ordem de leitura de texto, ou seja, de cima para baixo e da esquerda para a direita, sendo a contingência mais severa aquela que causou divergência do fluxo de potência com o menor número de iterações e a menos severa aquela em que o fluxo de potência convergiu e obteve o menor somatório de todos os *mismatches* de potência ativa e reativa.

No caso de uma ou mais contingências possuírem a mesma severidade, como por exemplo, duas contingências originaram divergência do fluxo de potência com o mesmo número de iterações, o “desempate” entre elas é realizado pela ordem de entrada na lista de contingências a serem selecionadas. Assim a contingência mais próxima do início da lista é classificada como mais severa.

5.2 Método de seleção de contingência

As contingências são selecionadas por sua severidade. A quantidade de contingências selecionadas é definida pelo usuário.

As contingências que não originaram divergência do fluxo de potência ou violação de critérios ou margem nunca são selecionadas. Em outras palavras, o VSAT seleciona somente as contingências que afetam o sistema.

Quando o usuário define um número de contingências a serem selecionadas inferior à quantidade de contingências que afetam o sistema (que causam divergência do fluxo de potência ou violação de algum critério de tensão ou de margem de potência) o VSAT faz uma nova classificação das contingências para ratificar a classificação ou retificar um possível erro de classificação. Após a reclassificação o VSAT seleciona as mais severas.

Esta reclassificação é realizada por um outro processo, conhecido como “*Simultaneous Binary Search*” ou SBS [4]. O método SBS também é conhecido por Método da Bisseção.

Nesta reclassificação, a severidade das contingências é dada em ordem decrescente do carregamento com o qual elas tornaram o caso inseguro. É considerada mais severa aquela que tornou o caso instável com o menor carregamento.

6.0 - AVALIAÇÃO E RESULTADOS

Para balizar a avaliação da ferramenta VSAT foi utilizado o programa ANAREDE do CEPEL para determinar a máxima transferência de potência na mesma direção de transferência que o VSAT e o FLUPOT, também do CEPEL, para calcular as ações de controles necessárias para corrigir as violações de segurança de tensão.

Foram utilizados diversos casos bases e cenários na avaliação. Verificou-se que sistemas muito grandes podem trazer problemas de convergência em áreas eletricamente distantes da região estudada levando a falsos limites de transferência de potência. Em outras palavras é aconselhável a utilização de sistemas equivalentes representativos das áreas que não estão em estudo.

Para aferição dos resultados do VSAT utilizando o ANAREDE este deveria seguir a mesma metodologia utilizada pelo VSAT. Em resumo, após convergir cada passo, aplicar as contingências e a, retornar ao ponto inicial, incrementar mais um passo, e aplicar novamente as contingências e a margem.

Como exemplo, é mostrado na Tabela 2 os resultados comparativos do VSAT e do ANAREDE para 3 cenários. Foi utilizado como caso-base o caso mensal do Sistema Interligado Nacional (SIN) de outubro de 2001 para carga pesada. O elo de corrente contínua, e os subsistemas Nort-Nordeste, Mato Grosso e GO/Brasília foram tratados por equivalentes.

Os Cenários 1 e 2 diferem entre si pois no primeiro, a transferência de potência e a margem de carga na Área Rio são supridas por Itaipu ao passo que no segundo, estas são supridas por um grupo formado pelas usinas de Itaipu, Luiz Carlos Barreto, Furnas, Marimbondo, Mascarenhas de Moraes A e B, Fontes e Pereira Passos. O Cenário 3 faz com que o VSAT trabalhe da maneira como usualmente é feito pelo ANAREDE, ou seja, introduzindo como caso base o caso já com a contingência. Este cenário é idêntico ao Cenário 2 excetuando-se o fato de que a contingência que causou o limite de transferência foi introduzida no caso base e foi eliminada a lista de contingências.

Utilizando os mesmos cenários, ou seja, sistemas, tolerâncias, parâmetros, critérios e contingências, as ferramentas apresentaram resultados muito próximos.

TABELA 2 - Comparação entre ANAREDE e o VSAT

Ferramenta	Cenário 1			
	Incremento (%)	Limitador		
		Conting.	Motivo	Barras
VSAT	16,117	140-147	Tensão	1752
ANAREDE	17,124	140-147	Tensão	148
	Cenário 2			
	Incremento (%)	Limitador		
		Conting.	Motivo	Barras
VSAT	16,117	140-147	Tensão	1752
ANAREDE	17,124	140-147	Diverge	--
	Cenário 3			
	Incremento (%)	Limitador		
		Conting.	Motivo	Barras
VSAT	17,124	140-147	Tensão	1752
ANAREDE	17,124	140-147	Tensão	1752

Com base na experiência adquirida com a ferramenta e na experiência dos operadores com o sistema elétrico brasileiro, foram criadas diretrizes, metodologias e critérios para utilização do VSAT Destes, os principais são:

- Diretrizes
 - Os dados para a solução do fluxo de potência serão convertidos de dois arquivos texto, obtidos com os comandos CART e PRES no ANAREDE. Estes arquivos deverão ser convertidos para o formato PSF-ACSII;
 - Os elementos do sistema deverão estar descritos com o maior detalhamento possível, principalmente os limites de potência ativa e reativa dos geradores, limites de absorção e geração de potência reativa em compensadores, limites de taps em LTCs e limites de carregamento de linhas e transformadores;
 - deve-se evitar a utilização do SIN, adotando-se sistemas equivalentes preservando as áreas em estudo.
- Metodologias
 - definir a região de transferência;
 - definir o equivalente do sistema elétrico que será utilizado;
 - definir os parâmetros para execução do fluxo de carga, tais como tolerâncias e controles ativos durante o fluxo de carga;
 - definir os critérios de tensão, reserva de potência reativa e das margens de carga e geração;
 - definir a lista de contingências e dos parâmetros para seleção de contingências a serem aplicadas;
 - definir as variáveis monitoradas (tensões, reserva de potência reativa e fluxos em circuitos e interfaces);
 - definir os equipamentos disponíveis para ações de controle preventivas e corretivas.
- Critérios
 - devem ser fornecidos os limites ("rating") de carregamentos de linhas e transformadores de acordo com os Procedimentos de Rede, Módulo 23, Sub-módulo 23.3, itens 5.3.3 e 5.3.4.
 - o passo de acréscimo de carga não deve ser grande, para não comprometer a característica de convergência e nem muito pequeno para não comprometer a velocidade da solução. É recomendado 1% (um por cento) da carga da área em estudo.
 - a margem é a mínima distância a ser mantida do ponto crítico, devendo-se adotar aquelas definidas nos Procedimentos de Rede, Módulo 23, Sub-módulo 23.3, itens 7.3.4 e 7.3.5.
 - recomenda-se que os níveis de tensão e os critérios para estes sejam aqueles contidos nos Procedimentos de Rede, Módulo 23, Sub-módulo 23.3, itens 5.3.1, para operação em condições normais.
 - recomenda-se verificar a possibilidade de se relaxar os níveis de tensão para operação sob contingências simples, por exemplo, através de um relaxamento de 0,05 p.u.
 - Recomenda-se que as barras fictícias e barras de passagem sejam excluídas dos critérios de tensão.

7.0 - CONCLUSÃO

No contexto deste trabalho, ou seja, para utilização da ferramenta em estudos de planejamento da operação do sistema elétrico, verificou-se que o VSAT pode ser utilizado. Este fornece os limites de segurança de tensão, e uma lista de eventos críticos. E sugere medidas preventivas e corretivas para a mitigar e, se possível, eliminar os problemas de segurança de tensão.

Como não podia deixar de ser, foram constatados pontos favoráveis e desfavoráveis na ferramenta. Estes se relacionam, em sua grande maioria, com a utilização da ferramenta e com a apresentação dos resultados. Os pontos favoráveis são:

- Grande velocidade de execução, mesmo sendo necessária a execução de inúmeros fluxos de carga;
- A ferramenta possui uma interface que fornece uma fácil e rápida visualização dos resultados das simulações;
- Fornece arquivos detalhados de cada ponto de operação testado durante o cálculo dos limites de transferência de potência;
- Fornece sugestões de medidas preventivas e corretivas para que se consiga aumentar este limite de transferência;
- Possui um eficiente método de seleção de eventos críticos ao sistema elétrico em análise;
- Permite que vários cenários sejam analisados simultaneamente, o que pode ser utilizado para se reduzir o tempo de uma análise comparativa entre várias direções de transferência de potência;
- Embora o método de solução do fluxo de carga não seja considerado um método muito robusto (é utilizado o Método Desacoplado Rápido), fornece resultados muito próximos daquele obtidos com o ANAREDE utilizando Método de Newton-Raphson completo.

Os pontos desfavoráveis são:

- a passagem do ponto de operação após ações de controle para a continuação o crescimento de carga é manual;
- o limite de barras submetidas aos critérios e a monitoração é muito menor que a quantidade de barras do SIN;
- existe um problema de dimensão entre as tolerâncias utilizadas durante o cálculo do limite de transferência de potência (4 casas decimais) e aquela utilizada durante as Ações de Controle (3 casas decimais) que pode fazer com que uma barra de geração cuja tensão foi levada ao limite pela função Ação de Controle esteja fora dos critérios de tensão para o cálculo do limite de transferência.

Um outro ponto importante de discussão é que o cálculo do limite de transferência depende fortemente das características de convergência do algoritmo de fluxo de carga. A não convergência e a divergência são consideradas sinônimos do ponto de operação ser aquele da máxima transferência. Em outras palavras, se o fluxo de carga não converge, isso significa que o ponto de operação é aquele da "ponta do nariz".

Em princípio, o Método Desacoplado Rápido não é adequado às características do SIN, e a não convergência ocorre para pontos de operação

afastados um certo número desconhecido de MWs do ponto de máxima transferência. Portanto, seria mais adequado, também em princípio, que a ferramenta utilizasse um algoritmo com base no Método de Newton, com as equações de controle embutidas, e ainda, que esse algoritmo fosse parametrizado. Futuros testes numéricos vão determinar a real necessidade deste aperfeiçoamento.

A ferramenta VSAT utilizada é uma ferramenta em fase de desenvolvimento. É a versão 1.2. É muito importante considerar que a aplicação da ferramenta está condicionada a futuros desenvolvimentos, alguns provavelmente específicos para o SIN. Essa afirmação não é nenhuma novidade, pois é o que se verifica com as ferramentas computacionais ora em uso e em desenvolvimento. Portanto, como aspecto de valor para aquisição da ferramenta, deve-se buscar obter junto ao fornecedor a garantia de estabelecimento de canal adequado que permita promover a incorporação de desenvolvimentos necessários.

Para a tomada desta decisão deve-se levar em conta que a ferramenta VSAT, especificamente o cálculo do limite de transferência e o cálculo de ações de controle, é um programa computacional com bases técnicas muito próximas daquelas das ferramentas de uso corrente no setor. Eventualmente pode ser considerado mais adequado solicitar aperfeiçoamentos nessas ferramentas para se chegar às funcionalidades requeridas.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEEE / PES POWER SYSTEM STABILITY SUBCOMMITTEE, "Voltage Stability Assessment, Procedures and Guides", Final Draft, Janeiro 2001;
- [2] POWERTECH LABS, "VSAT version 1.2 – Installation Guide and User Manual", Canadá, 2001.
- [3] PRADA, R.B., DA SILVA, L.X., "Projeto VSAT - Relatório Final", Junho 2002, Brasil.
- [4] CUTSEM, T. V., MOISSE C., e MAILHOT, R., "Determination of Secure Operating Limits with Respect to Voltage Collapse", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 1, Fevereiro 1999, pp. 327-335.