



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

GAT 14
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO IV

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

ESTUDOS AUTOMATIZADOS DE RECOMPOSIÇÃO DO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL UTILIZANDO NOVAS FACILIDADES COMPUTACIONAIS NO PROGRAMA ANAREDE

Antônio de Pádua Guarini*

Lúcia Mariana de Souza

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

Ricardo Mota Henriques

João Alberto Passos Filho

Flávio Rodrigo de Miranda Alves

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo apresentar as novas facilidades do programa ANAREDE, implementadas especialmente para agilizar os estudos de recomposição do Sistema Interligado Nacional (SIN). Estas facilidades incluem o automatismo na análise de corredores de recomposição fluente e um processo passo a passo nos estudos de recomposição nas fases fluente e/ou coordenada, quando da interligação de áreas de recomposição ou em função da indisponibilidade de equipamentos de um corredor de recomposição fluente.

PALAVRAS-CHAVE

Segurança Operativa do Sistema Interligado Nacional, Processo de Recomposição e Estudos de Sistemas de Potência.

1.0 - INTRODUÇÃO

Toda e qualquer modificação na rede do Sistema Interligado Nacional (SIN), seja pela entrada em operação de novos sistemas de geração e/ou de transmissão, seja pela recapacitação de sistemas já existentes, exige a realização de estudos para reavaliação dos procedimentos de recomposição ou, eventualmente, a criação de uma nova área de recomposição. Estes estudos podem exigir, por sua vez, alterações nos procedimentos de recomposição e a conseqüente modificação das Instruções Operativas.

Diante da expansão do SIN, a probabilidade de ocorrência de um blecaute geral foi reduzida. No entanto, por mais bem planejado e operado que seja um sistema elétrico, sempre existe a possibilidade de que este tipo de evento volte a ocorrer. Em função disso, é necessário um estudo estruturado para a recomposição do sistema elétrico, bem como a definição de procedimentos de recomposição precisos, detalhados e flexíveis, de modo a agilizar o restabelecimento do fornecimento de energia após um blecaute.

Os estudos de recomposição para os diversos corredores que compõem o SIN são atividades que consomem um tempo considerável. Uma maneira de minimizar o esforço necessário para a execução destes estudos é aparelhar as ferramentas computacionais utilizadas para esta atividade com funcionalidades que permitam a automatização de boa parte do trabalho hoje realizado manualmente. Outra possibilidade é a inclusão nestas ferramentas de algoritmos que indiquem ao engenheiro de potência rotas alternativas a serem estudadas no caso de indisponibilidade de equipamentos nos corredores normalmente utilizados para a recomposição ou de criação de uma nova área de recomposição.

Neste sentido, de modo a reduzir significativamente o esforço necessário para a realização de estudos de recomposição, o ONS vem desenvolvendo, em parceria com o CEPEL, o Projeto “Aperfeiçoamentos nas Ferramentas Computacionais para Agilizar os Estudos de Recomposição” do Plano de Ação 2006-2008.

Uma das novas funcionalidades incorporadas ao programa ANAREDE no âmbito deste projeto é a possibilidade de concentrar, em um único arquivo, todas as tarefas rotineiras de preparação de casos de regime permanente para estudos de recomposição, incluindo a descrição, dados e manobras dos corredores de recomposição a serem avaliados. Esta facilidade, aliada à implementação de uma função de análise automática de corredores de recomposição, permite a avaliação simultânea de diversos corredores de recomposição fluente, suas interligações e, em caso de indisponibilidade, a definição de procedimentos alternativos a serem incluídos nas Instruções Operativas existentes.

2.0 - FUNDAMENTOS BÁSICOS DA RECOMPOSIÇÃO

Devido aos blecautes que ocorreram no passado, foram implantadas no ONS e nas instalações dos Agentes novas diretrizes e critérios para a recomposição da malha principal e de suas instalações. Assim, quando da ocorrência de um blecaute, espera-se que o restabelecimento das cargas seja feito no menor período de tempo possível.

A filosofia básica da recomposição define que as áreas geoeletricas criadas a partir das usinas hidráulicas de auto-restabelecimento devem ser aquelas dotadas de uma configuração mínima de rede que permita o restabelecimento das cargas prioritárias de forma rápida e segura. Esta mesma filosofia divide o processo de recomposição em duas fases: fluente e coordenada.

2.1 Etapas da Recomposição

A fase fluente da recomposição é determinada por processos operacionais previamente definidos que permitem às áreas geoeletricas executarem isoladamente as ações para o restabelecimento das cargas, de forma simultânea e independente de outras áreas. Durante esta fase da recomposição as ações são realizadas sem que haja a necessidade de comunicação entre os Centros de Operação e/ou operadores de determinada área, desde que não se tenha restrições operativas que impeçam a sua continuidade.

Para iniciar o processo fluente de restabelecimento das cargas prioritárias, devem ser observadas algumas condições pré-definidas para garantir um processo seguro. Tais condições são:

- A área responsável por iniciar o processo fluente deverá contar com uma ou mais usinas capazes de se auto-restabelecer, independente de qualquer alimentação externas. Estas usinas são denominadas de *black-start*, ou, de auto-restabelecimento;
- Estabelecer a tensão mínima de partida das unidades geradoras da usina de modo a permitir a energização de todas as subestações da fase fluente. Associar o ajuste de tensão das unidades geradoras, até o seu máximo permissível, ao restabelecimento das cargas prioritárias da referida área geoeletrica;
- Definir o número mínimo de unidades geradoras da(s) usina(s) para atender os limites de potência ativa e, principalmente, reativa, de acordo com as suas curvas de capacidade e os problemas de auto-excitação que podem ocorrer devido a rejeições de carga;
- Definir um conjunto mínimo de reatores para que seja possível a energização de toda a área geoeletrica em vazio. Este conjunto deverá ser capaz de suportar eventuais rejeições de carga, evitando a atuação das proteções, o que poderia levar ao desligamento do todo ou de parte da área recomposta;
- Procurar compatibilizar a carga e a geração da área geoeletrica a ser recomposta.

Os Agentes envolvidos deverão comunicar aos Centros de Operação o término da fase fluente de suas instalações e aguardar o início da fase coordenada. A fase coordenada é iniciada após o término das fases fluentes ou no momento em que haja alguma restrição operativa, como indisponibilidade de equipamentos. Durante toda esta fase as ações são conduzidas pelos Centros de Operação para garantir a estabilidade do sistema nas seguintes situações:

- Restabelecimento de cargas adicionais;
- Interligação entre as áreas geoeletricas estruturadas já na fase fluente da recomposição através do fechamento de paralelo e anéis;
- Na impossibilidade de se concluir o processo fluente de alguma área em função de restrições operativas, tais como indisponibilidade de equipamentos, coordenar o processo no sentido de adotar procedimento alternativo;
- Promover a energização de equipamentos como compensadores estáticos, geradores síncronos e elos CC.

3.0 - CRITÉRIOS PARA OS ESTUDOS DE RECOMPOSIÇÃO

Os estudos de recomposição são estruturados e planejados para definir as diretrizes dos procedimentos de recomposição, tanto fluente quanto coordenada. O número de análises utilizadas nestes estudos é diverso, sendo necessárias as seguintes etapas de estudos:

- Estudos em regime permanente;
- Estudos de estabilidade eletromecânica;
- Estudos de transitórios eletromagnéticos.

3.1 Estudos em Regime Permanente

Os estudos de regime permanente permitem analisar as diversas condições da área durante a recomposição no que tange ao perfil de tensão, carregamento dos equipamentos de transmissão e transformação, capacidade das unidades geradoras e o uso de equipamentos *shunt* para controle de tensão. As análises nesta etapa contemplam os procedimentos fluentes e procedimentos alternativos coordenados, em situações de indisponibilidade de equipamentos.

Nestes estudos são determinadas algumas condições tanto para a fase fluente quanto para a fase coordenada de modo a satisfazer os critérios e limites pré-definidos no Submódulo 23.3 dos Procedimentos de Rede do ONS. Tais condições são: disponibilidade de geração nas usinas de auto-restabelecimento, número mínimo de unidades geradoras, tensão mínima de partida das unidades geradoras e conjunto mínimo de reatores shunt para que não haja risco de sobretensões. Quando da definição do montante de carga a ser restabelecido deve haver compatibilidade entre geração e carga e a divisão desta última em patamares.

3.2 Estudos de Estabilidade Eletromecânica

Os estudos de estabilidade eletromecânica analisam o comportamento do sistema frente a oscilações de frequência e tensão durante manobras de energização de linhas de transmissão, transformadores (com carga) e nas tomadas e/ou rejeições de carga, simulando a atuação dos reguladores de tensão e de velocidade das usinas geradoras.

Quando do fechamento de paralelos ou de anéis, deverão ser investigados os módulos das tensões e aberturas angulares, respeitando os critérios e limites pré-definidos no Submódulo 23.3 dos Procedimentos de Rede do ONS. Também deverá ser observada a variação instantânea da potência elétrica da(s) usina(s) durante o fechamento entre áreas dentro dos limites definidos neste submódulo.

3.3 Estudos de Transitórios Eletromagnéticos

Os estudos de transitórios eletromagnéticos consistem em verificar as solicitações de manobra de equipamentos, tais como, energização de linhas de transmissão e transformadores, rejeição de cargas, etc.

Para a manobra de linhas de transmissão e transformadores, estes estudos definem os valores máximos de tensão dos quais os equipamentos podem ser manobrados em função das solicitações decorrentes dessa energização. Enquanto que para rejeição de carga, estes estudos definem os montantes máximos de tomada fluente de carga, durante o processo de recomposição, como também, a definição da configuração mínima de reatores do sistema.

Nos estudos de recomposição as principais ferramentas utilizadas na simulação são:

- ANAREDE: para os estudos de regime permanente;
- ANATEM: para os estudos de estabilidade eletromecânica;
- ATP: para os estudos de transitórios eletromagnéticos.

4.0 - NOVAS FUNÇÕES DO PROGRAMA ANAREDE PARA OS ESTUDOS DE RECOMPOSIÇÃO

Na etapa de preparação dos casos de regime permanente são simuladas as diversas condições de operação para a definição do processo de recomposição fluente de uma área geoeletrica e seu procedimento alternativo para a condição de indisponibilidade de equipamentos.

O programa ANAREDE, utilizado para a simulação dos casos de regime permanente, foi modificado e equipado com novas funcionalidades específicas para o auxílio nos estudos de recomposição, visando facilitar o trabalho de preparação de dados e simulação.

4.1 Estudos de Recomposição com o ANAREDE Convencional

Na preparação de um estudo de recomposição de regime permanente era necessária a criação de diversos casos para a simulação de todo o processo de recomposição. Cada um destes casos representava o conjunto de manobras relativo a um trecho do corredor de recomposição, tais como energização de linhas, de transformadores

ou reatores, alteração da tensão das unidades geradoras, restabelecimento de cargas e fechamento de paralelos ou anéis. Desta forma, o estudo ficava pulverizado em diversos arquivos de dados, dificultando seu gerenciamento, modificação e a visão do processo como um todo. A Figura 1 ilustra como era o processo de preparação de um estudo de regime permanente para recomposição, onde pode ser constatado que para qualquer alteração era necessário simular novamente diversos casos.

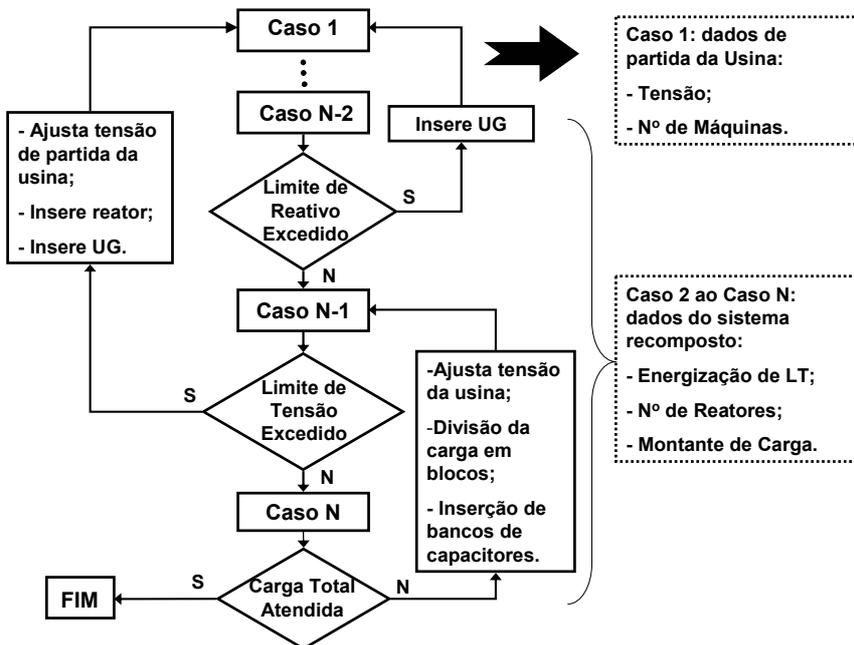


FIGURA 1 – Estudos de Regime Permanente para Recomposição do Sistema Através do ANAREDE Convencional

A partir de um caso inicial com apenas os dados de partida da usina de auto-restabelecimento eram montados os casos consecutivos de um processo de recomposição. Para a preparação destes casos apenas os equipamentos do corredor de recomposição eram considerados à medida que fossem energizados caso a caso, sendo necessário eliminar todo o restante do sistema elétrico.

Os estudos de regime permanente para recomposição, principalmente quando da criação de um novo corredor de recomposição, são baseados em uma análise de sensibilidade, ou seja, a qualquer energização ou tomada de carga devem ser verificados os limites de tensão e capacidade das unidades geradoras.

Nos casos de avaliação da recomposição em vazio, sem restabelecimento de cargas, são verificados os maiores níveis de tensão, bem como, um maior consumo de potência reativa. A violação dos limites de tensão levaria a necessidade de modificar a tensão de partida da usina de auto-restabelecimento, a inserção de mais reatores e/ou a inserção de mais unidades geradoras. Nas situações em que o limite de geração de potência reativa da usina atinja ao limite, há a necessidade de inserção de mais unidades geradoras.

Mesmo tendo sido definido o processo de recomposição em vazio, ainda há a necessidade de se verificar o restabelecimento total da carga, avaliando os possíveis montantes de carga divididos em blocos e os ajustes de tensão na usina.

Para a inclusão dos ajustes de tensão da usina, inserção de unidades geradoras, manobra de reatores e divisão da carga quase todos os casos anteriormente avaliados deveriam ser alterados e simulados novamente.

4.2 Estudos de Recomposição com o ANAREDE Automatizado (Versão 9.1.3)

Nesta nova versão do ANAREDE foi implementado o conceito de estado operativo para barras, circuitos, equipamentos *shunt*, motores de indução, geradores e elos de corrente contínua, o que permite ligar ou desligar estes equipamentos sem a necessidade de eliminá-los do caso. Conseqüentemente, é possível preservar os dados de equipamentos que ainda serão energizados em trechos futuros do corredor de recomposição e até mesmo daqueles que não participam do processo de recomposição sob análise. Além disso, com o novo Código de Execução DAVR (leitura dos dados de trechos de corredores de recomposição) [7], as manobras passaram a ser definidas em um único arquivo, onde os trechos, antes pulverizados por diversos arquivos de dados, ficam reunidos em um único arquivo, uma vez que o estado operativo da barra permite preservar todos os dados do Sistema Interligado Nacional. Assim, para a simulação de um ou mais corredores de recomposição, apenas um arquivo de dados é necessário.

A Figura 2 ilustra a simplicidade da preparação e simulação de um estudo de regime permanente para recomposição de acordo com as novas funcionalidades do ANAREDE. Toda e qualquer alteração passa a ser feita em apenas um caso, bem como a simulação.

A partir da implementação das novas funcionalidades, os estudos de regime permanente para recomposição passaram a ser automatizados, o que permite análises de sensibilidade sem mais despende tanto tempo. A verificação dos limites de tensão, assim como, da capacidade das unidades geradoras, que antes eram verificadas manualmente pelo usuário, passaram a ser verificadas pelo próprio ANAREDE. Em resumo, a cada trecho de recomposição simulado, o próprio programa se encarrega de verificar os limites de tensão que podem ser definidos pelo usuário. Para a curva de capacidade das unidades geradoras o próprio programa determina os valores de potência ativa e reativa. Durante o processo de simulação dos trechos de recomposição, caso algum limite seja violado, o processo é interrompido e o controle retorna para o usuário.

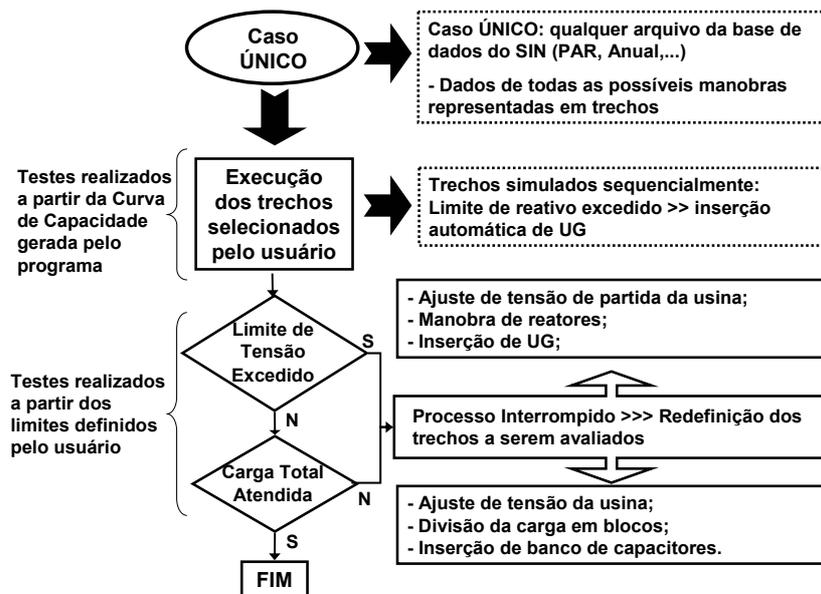


FIGURA 2 – Estudos de Regime Permanente para Recomposição do Sistema Através do ANAREDE V9.1.3

Com a possibilidade de definição dos trechos de corredores de recomposição, pode-se analisar diversas combinações de manobras, bastando para isto que sejam selecionados os trechos correspondentes às mesmas. Caso o processo de recomposição correspondente a um conjunto de trechos selecionados seja interrompido, por limite de tensão, basta selecionar outro conjunto de trechos de modo a contemplar os ajustes necessários, sem que para isso seja necessária a modificação de dados do arquivo. Se, mesmo assim, for necessário alterar dados de trechos de corredor de recomposição, isto pode ser feito, rápida e confortavelmente, através da interface gráfica do programa.

A individualização de equipamentos foi outra modificação implementada no programa que facilitou bastante a preparação dos estudos de regime permanente para recomposição. Os equipamentos *shunt*, reatores e capacitores, são representados em bancos, podendo ser de linha ou de barra. Para considerar a divisão da carga em blocos, estas também são definidas individualizadas. O modelo de gerador, além da possibilidade de individualização, com a especificação do número de unidades que compõem o grupo e quantas destas unidades estão efetivamente em operação, passa a incluir dados do transformador elevador e da própria máquina que permitem o traçado da sua curva de capacidade. Com estas facilidades são determinados automaticamente a reatância do transformador elevador e o ponto de operação na curva de capacidade da usina em função do número de unidades geradoras em operação.

5.0 - EXEMPLO DE ESTUDO DE RECOMPOSIÇÃO

A nova versão do ANAREDE unifica a versão orientada a linha de comando (versão DOS) e a versão gráfica (Visual ANAREDE) através de um console de comandos interativo com o usuário, conforme ilustrado na Figura 3. Este console permite a visualização, no diagrama unifilar, de equipamentos ligados e desligados. Os equipamentos podem também ser manobrados ou ter seus dados modificados via interface gráfica.

O caso exemplo utilizado neste trabalho, a Área Taquaruçú / Porto Primavera, tem por finalidade mostrar quais problemas poderão acontecer na análise de regime permanente quando da recomposição desta área. A partir de um arquivo da base de dados do ONS, por exemplo um caso de quadrimestral, é montado o caso único do ANAREDE para estudo de regime permanente para recomposição da Área Taquaruçú / Porto Primavera. Esta

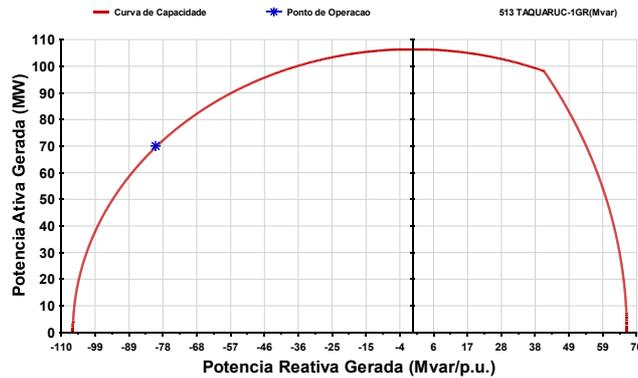


FIGURA 5 – Curva de Capacidade da Usina de Taquaruçú com 1 Máquina

5.3 Limite de Tensão

Diante da possibilidade de diversas combinações de manobras, é analisado o número de equipamentos *shunt*, reatores, a serem energizados ao logo de todo o processo de recomposição. Em um processo de recomposição procura-se energizar um menor número de reatores.

Para a avaliação da Área Taquaruçú / Porto Primavera constatou-se indispensável a energização dos reatores de linha e barra da SE Sumaré. A Figura 6 mostra que ao tentar energizar a LT 440 KV Assis / Sumaré sem um dos reatores de Sumaré o processo é interrompido indicando sobretensão nas barras de Assis e Sumaré. Para solucionar o problema de sobretensão, basta apenas, selecionar os trechos que considere a energização de ambos os reatores da SE Assis.

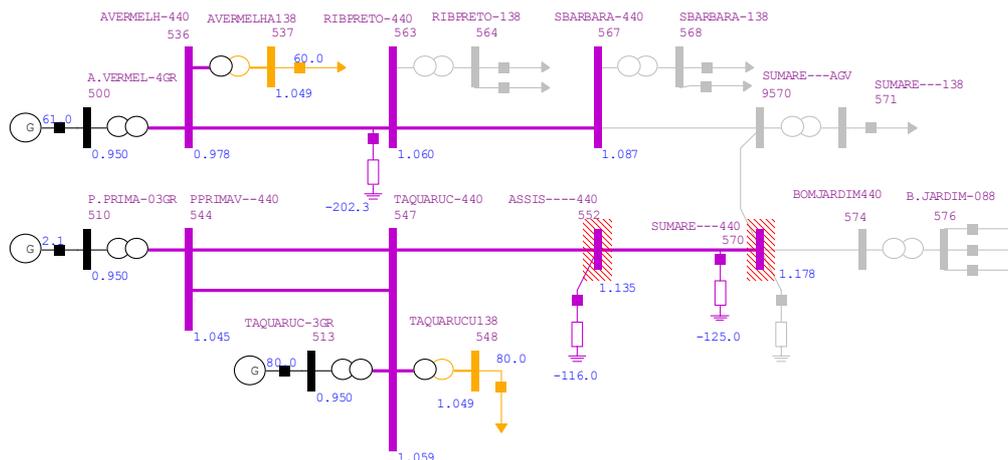


FIGURA 6 – Processo Interrompido por Sobretensão

5.4 Restabelecimento da Carga

O montante da carga a ser restabelecido em cada subestação é avaliado de tal modo que não comprometa o sistema já recomposto. Assim, a carga é dividida em blocos e restabelecida durante a avaliação dos trechos. A Figura 7 exibe o afundamento de tensão ao tentar restabelecer o terceiro bloco de carga na SE Bom Jardim. Ao atingir o limite inferior de tensão, pré-definido pelo usuário, o programa é interrompido. Para contornar este problema, avalia-se o corredor de recomposição sem incluir o trecho correspondente ao restabelecimento do terceiro bloco de carga da SE Bom Jardim.

Muito embora o estudo de regime permanente indique o montante de carga, bem como a sua divisão em blocos, é o estudo de estabilidade dinâmica que define estes valores. Pois, é necessário avaliar tanto o restabelecimento quanto a rejeição da carga, para que sejam verificadas principalmente as oscilações de frequência e tensão. Sendo assim, a divisão da carga em blocos facilita o estudo de recomposição quando da reavaliação de um estudo de regime permanente em função dos estudos de estabilidade dinâmica.

Um dos objetivos do corredor da Área Taquaruçú / Porto Primavera é o restabelecimento das cargas da SE Sumaré, objetivo comum à Área Água Vermelha. No entanto, devido ao arranjo da SE Sumaré não é possível que ambas as áreas atendam a sua carga. Por esta razão, somente numa fase coordenada é que a Área Taquaruçú / Porto Primavera poderá restabelecer um montante de carga adicional na SE Sumaré, ou na impossibilidade da

Área Água Vermelha chegar a SE Sumaré, esta, então, será atendida de forma coordenada pela Área Taquaruçú / Porto Primavera.

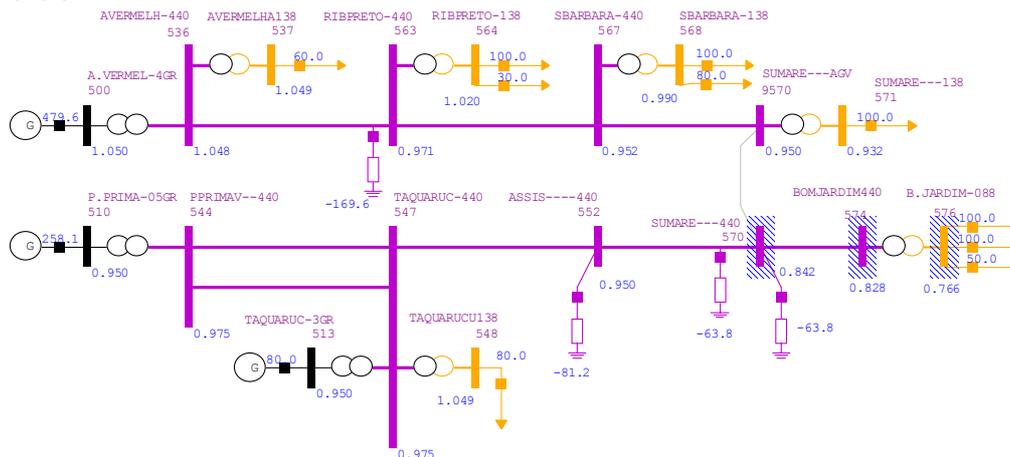


FIGURA 7 – Processo Interrompido por Subtenção

6.0 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A implementação das novas funcionalidades no ANAREDE agilizou a preparação de casos e a execução dos estudos de regime permanente para recomposição de áreas do SIN. A introdução do estado operativo de barra e de equipamentos, a individualização de equipamentos como geradores, reatores, capacitores e cargas, e, principalmente, a unificação de todo o processo de recomposição de uma área em um único arquivo de dados simplificou a análise de resultados. Além disso, futuras reavaliações destes corredores serão realizadas de forma mais rápida, através da reutilização do bloco de dados de corredores de recomposição.

As melhorias na interface gráfica permitem uma melhor interação com o usuário, possibilitando a preparação e execução de um estudo através dos diálogos de dados e execução de funções de recomposição aliados ao console de comandos da nova versão do ANAREDE.

Apesar da evolução representada pela versão 9.1.3 do ANAREDE, novas implementações continuam sendo necessárias para atender a filosofia de recomposição adota no SIN e tornar ainda mais produtivos os esforços das equipes de estudo. Algumas das melhorias que necessitam ser implementadas são:

- *Split* de barra: torna possível identificar se os equipamentos necessários do processo podem ser manobrados, além da definição de onde poderá ser feito o fechamento de paralelo e anel;
- Inserção de unidades geradoras adicionais em função de sobretensão quando esgotados todos os reatores de um corredor de recomposição;
- Variação da tensão de uma usina para viabilização do corredor de recomposição a partir do restabelecimento das cargas (corredor de recomposição em vazio já estabelecido);
- Cálculo de tensão em extremidade aberta de circuito sem a necessidade de inclusão de barra fictícia.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Procedimentos de Rede – Módulo 23 – Submódulo 23.3 – Critérios para Estudos Elétricos.
- (2) GCOI – Grupo Coordenador para Operação Interligada, *Filosofia de Recomposição do Sistema Sul/Sudeste/Centro-Oeste*, Relatório 01/97 do Subcomitê de Operação (SCO) do Grupo Coordenador para Operação Interligada (GCOI).
- (3) GOMES, P., GUARINI, A. P., LIMA, A. C. S, SOARES, M., “Analysis of Restoration Proceedings in the Brazilian Power System”, VIII SEPOPE, 2002, Brasília.
- (4) ALVES, F.R.M., PASSOS Fº, J.A., HENRIQUES, R. M., GOMES, P., GUARINI, A. P., GUARINI, M.C., “Equipando um Programa de Fluxo de Potência para Estudos de Recomposição de Sistemas Elétricos”, XVIII SNPTEE, Outubro/2005, Curitiba (PR), Brasil.
- (5) ALVES, F.R.M., FALCÃO, D.M., GUARINI, A. P., PASSOS Fº, J.A., HENRIQUES, R. M., “Recomposição Fluente de Sistemas Elétricos de Potência Uma Abordagem Via Grafos e Buscas Heurísticas”, XIX SNPTEE, Outubro/2007, Rio de Janeiro (RJ), Brasil.
- (6) ONS - Relatório Técnico ONS RE3-223/2006, “Estudos de Recomposição do Sistema da Região Sudeste – Área Taquaruçú / Porto Primavera” (28/08/2006).
- (7) CEPEL, Relatório Técnico DP/DPP – 30875/2006, “Programa de Análise de Redes – ANAREDE V09.00.00 - Manual do Usuário”.