



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

GAT 33  
14 a 17 Outubro de 2007  
Rio de Janeiro - RJ

#### **GRUPO IV**

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

#### **RECOMPOSIÇÃO FLUENTE DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA UMA ABORDAGEM VIA GRAFOS E BUSCAS HEURÍSTICAS**

**Flávio Rodrigo de Miranda Alves\***  
CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

**Djalma Mosqueira Falcão**  
COPPE/UFRJ

**Antônio de Pádua Guarini**  
ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

**Ricardo Mota Henriques**  
CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

**João Alberto Passos Filho**

#### **RESUMO**

A recomposição de um sistema elétrico de potência após um *black-out* deve ser efetuada rapidamente, o que exige procedimentos de recomposição precisos e detalhados. Uma das ferramentas mais utilizadas em estudos de recomposição é o fluxo de potência. A expansão do Sistema Interligado Nacional exige a criação de novos procedimentos de recomposição e a constante reavaliação daqueles já existentes. Este trabalho descreve o desenvolvimento de uma metodologia baseada em algoritmos de busca heurística que automatiza uma parcela significativa do trabalho de determinação de corredores de recomposição fluente, reduzindo o esforço das equipes de estudo e viabilizando a avaliação do maior número possível de alternativas.

#### **PALAVRAS-CHAVE**

Fluxo de Potência, Recomposição, Grafo, Busca Heurística

#### **1.0 - INTRODUÇÃO**

O problema de recomposição de um sistema elétrico de potência (SEP) após um *black-out* total ou parcial remonta à própria origem da indústria de energia elétrica. Qualquer que seja a abordagem utilizada numa tentativa de equacionamento e formalização, de um ponto de vista estritamente matemático, revela um problema de otimização, multiobjetivo e multiestágio, não-linear, envolvendo variáveis discretas e contínuas (1). A natureza combinatorial do universo de possíveis soluções e as incertezas associadas aos montantes de carga (2) e à disponibilidade dos equipamentos de suporte de potência reativa quando da efetiva execução do processo de recomposição, completam o conjunto de características que tornam este problema extremamente complexo.

Após um *black-out* o fornecimento de energia elétrica deve ser restaurado rapidamente. Até a segunda metade da década de 70, o setor elétrico brasileiro (SEB) utilizava procedimentos de recomposição centralizados, efetuados através dos Centros de Operação. A ocorrência de um *black-out* desencadeava um intenso processo de comunicação entre as instalações e os Centros de Controle aos quais estavam subordinadas. Os operadores das subestações solicitavam orientação sobre as ações a serem tomadas para restabelecer o fornecimento de energia e executavam estritamente as instruções repassadas pelo Centro de Controle, voltando a se reportar a este na eventualidade de qualquer ocorrência. A ausência de procedimentos de recomposição pré-definidos, freqüentemente levava a um aumento excessivo destas comunicações e, conseqüentemente, ao estrangulamento de todo o procedimento de recomposição, demandando um tempo bem maior que o estritamente necessário para a recomposição do sistema (3). A partir do final da década de 70 o SEB iniciou esforços no sentido de abandonar

\*Av. Hum, s/nº - Ilha da Cidade Universitária - CEP 21941-598 – Rio de Janeiro - RJ - BRASIL  
Tel.: (021) 2598-6258 - Fax: (021) 2598-6451 - e-mail: frma@cepel.br

estas estratégias centralizadas. Estes estudos resultaram na definição da estratégia de recomposição atualmente praticada pelo setor, a qual divide o processo de recomposição em duas fases, denominadas Recomposição Fluente e Recomposição Coordenada. Durante a Recomposição Fluente os procedimentos operacionais previamente estabelecidos permitem a recomposição de áreas geoelectricamente definidas e a compatibilização de carga e geração em configurações mínimas de rede. Na Recomposição Coordenada os Centros de Operação do Sistema autorizam tomadas de carga adicionais e o fechamento de paralelos ou anéis entre as ilhas recompostas na Recomposição Fluente (4,5).

Para implementar de forma eficiente as fases fluente e coordenada, preconizadas pela atual filosofia de recomposição do Sistema Interligado Nacional (SIN), é necessário dispor de procedimentos de recomposição precisos e detalhados, que contemplem o maior número possível de alternativas. A geração destes procedimentos exige a realização de estudos nos quais são utilizadas diversas ferramentas de análise e simulação de SEPs, em especial fluxo de potência, transitórios eletromecânicos e transitórios eletromagnéticos (4).

Para fazer frente ao aumento da demanda gerado pela retomada do crescimento econômico, tem ocorrido uma significativa expansão do SIN, com a implantação de novas unidades geradoras e linhas de transmissão. Estas alterações topológicas e de distribuição de carga e geração exigem a contínua reavaliação dos procedimentos de recomposição existentes e a definição de procedimentos para novas áreas de recomposição. É necessário, portanto, reduzir o esforço das equipes de estudo de forma a viabilizar a avaliação do maior número possível de alternativas. O CEPEL e o ONS, atentos a estas necessidades do setor, decidiram dotar o programa ANAREDE (6) de facilidades que reduzem significativamente o trabalho do engenheiro durante um estudo de recomposição. Estas facilidades incluem uma metodologia que automatiza uma parcela razoável do trabalho de determinação de um corredor de recomposição fluente. Este trabalho apresenta os fundamentos desta metodologia, exemplifica sua aplicação e enumera os futuros desenvolvimentos previstos nesta linha de pesquisa.

## 2.0 - ESTUDOS DE RECOMPOSIÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Diversas ferramentas para simulação digital de sistemas elétricos de potência são utilizadas em um processo de recomposição, desde os estudos para definição dos corredores de recomposição até sua execução propriamente dita. Estas ferramentas podem ser classificadas em três categorias (1):

- ferramentas para estudos *off-line*
- simuladores para treinamento de operadores
- ferramentas de auxílio à recomposição em tempo real

No que se refere a ferramentas para estudos *off-line*, são utilizados programas de cálculo de fluxo de potência e simulação de transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos.

A avaliação de um corredor de recomposição começa com estudos de fluxo de potência, nos quais, inicialmente, é determinada a disponibilidade de geração. Esta disponibilidade considera  $n-1$  máquinas, supondo uma máquina em manutenção ( $P_{Disp} = 0,80 \cdot (n-1) \cdot P_{nom(unidade)}$ ), ou um número mínimo de máquinas sincronizadas para suprir a potência reativa necessária para compensar o corredor em vazio. A determinação do número mínimo de máquinas também considera a necessidade de se evitar auto-excitação no caso de rejeição de carga (4,5). Para manter os níveis de tensão dentro de faixas adequadas durante o processo de recomposição deve-se utilizar os recursos disponíveis para fornecimento de potência reativa pelas usinas de auto-restabelecimento, reatores *shunt* e tomadas de cargas intermediárias. Capacitores *shunt*, compensadores estáticos e compensadores síncronos não são considerados como instrumentos de controle de tensão durante a recomposição fluente, salvo em situações muito específicas. A disponibilidade de geração de potência reativa nas usinas de auto-restabelecimento é obtida a partir da curva de capacidade das unidades geradoras. Somado às características de impedância da configuração mínima da área geoeletrica, este montante de potência reativa permite determinar a carga que pode ser atendida, considerando sempre os limites de tensão para a recomposição fluente. De preferência, todo o corredor deve ser recomposto, admitindo-se que nenhuma carga tenha sido tomada e sem que o limite máximo de tensão tenha sido violado em qualquer barra do corredor. Para isso é definido o conjunto mínimo de reatores que viabiliza a recomposição através do corredor em questão. Finalmente, os limites operativos relacionados com os equipamentos de geração e transmissão devem ser respeitados em todas as etapas do processo de recomposição.

Os estudos de transitórios eletromecânicos definem se as manobras simuladas nos estudos de fluxo de potência são factíveis do ponto de vista dinâmico. Estes estudos visam avaliar o comportamento do sistema no que se refere a oscilações de frequência e tensão durante manobras de energização de linhas de transmissão e transformadores e nas tomadas e rejeições de carga. A simulação do comportamento dos reguladores de tensão e velocidade das unidades geradoras das usinas de auto-restabelecimento também é considerada. Além disso, nos casos de fechamento de paralelos e anéis, são avaliados os esforços torsionais nas máquinas, sobretensões dinâmicas e a estabilidade eletromecânica do sistema como um todo.

Os estudos de transitórios eletromagnéticos têm por objetivo a verificação de solicitações de curta duração

decorrentes de manobras tais como, energização de linhas de transmissão e transformadores, rejeição de cargas, etc. Assim, estes estudos definem os valores máximos de tensão nos terminais dos equipamentos de transmissão que permitem a sua energização sem risco de atuação da proteção de sobretensão. A atuação incorreta desta proteção causa uma nova série de desligamentos e atrasa o processo de recomposição. Outro aspecto abordado é a possibilidade de rejeição de carga. Nesta situação novamente são observados os ajustes da proteção de sobretensão e os valores de tensão que causariam o disparo de para-raios. O disparo acidental de para-raios pode danificá-los e causar a indisponibilidade do equipamento de transmissão por eles protegido, exatamente em um momento crítico do processo de recomposição (4).

### 2.1 Preparação de Dados e Metodologia de Trabalho em Estudos de Fluxo de Potência para Recomposição

Os estudos de fluxo de potência têm por objetivo analisar as condições do sistema nas diversas etapas da recomposição, garantindo a utilização dos equipamentos dentro de seus limites operativos, e determinam se a análise de um procedimento de recomposição deve ou não prosseguir ao longo de um determinado corredor. A preparação dos dados de fluxo de potência começa com a criação de um caso com um ou mais sistemas isolados, correspondentes às áreas geoeletricas. Sobre este caso são executados sucessivos fluxos de potência, com alterações topológicas e de carregamento, com o objetivo de verificar as condições operativas a cada novo trecho energizado. Se a execução do fluxo de potência não for bem sucedida e enquanto houver alternativas em termos de suporte de potência reativa, novas tentativas de alcançar as condições operativas especificadas para o trecho são executadas. O trabalho envolve intensa manipulação de dados, consideradas as facilidades normalmente disponíveis em programas de fluxo de potência.

Com o objetivo de reduzir o trabalho do engenheiro em estudos de recomposição, permitindo que este profissional concentre-se na análise dos resultados e elaboração de alternativas e não em edição de dados e gerenciamento de inúmeros casos de fluxo de potência, CEPEL e ONS decidiram dotar o programa ANAREDE (6) de facilidades específicas para estudos de recomposição (7). A primeira etapa deste trabalho teve como principal objetivo dotar o programa de equipamentos individualizados, permitindo uma modelagem do sistema elétrico muito mais próxima da realidade de campo. Também foram introduzidos os conceitos de grupo de equipamentos e estado operativo. O conceito de grupo de equipamentos permite a especificação do número de unidades que compõem cada grupo de equipamentos e quantas destas unidades estão em operação, enquanto o conceito de estado operativo permite ligar ou desligar um grupo sem que seja necessário editar arquivos de dados. Mais do que isso, a introdução do estado operativo criou a infra-estrutura necessária para a implementação de algoritmos de avaliação e determinação automática de corredores de recomposição. A implementação destes algoritmos dispondo apenas de modelos de equipamentos equivalentes seria impossível. Ainda nesta etapa, foi desenvolvido um modelo de gerador individualizado que considera os limites de geração de potência reativa em função dos limites da curva de capacidade da máquina.

Estudos de recomposição ciclos de intensa manipulação de dados, execução de fluxo de potência e análise de resultados. Na segunda etapa de implementações específicas para recomposição de SEP foi desenvolvida uma função para avaliação automática de corredores de recomposição. Associado a esta função, foi criado um novo bloco de dados com o qual o usuário pode definir corredores de recomposição através do conjunto de manobras a ser executado em cada trecho. A execução das manobras em cada trecho é precedida pela verificação dos limites de tensão de pré- energização dos equipamentos série energizados no trecho, para os quais também foi criado um novo bloco de dados. A análise do corredor pode ser executada passo a passo ou de forma automática. No modo automático, o programa executará o fluxo de potência para todos os trechos, enquanto não ocorrerem violações de tensão pré ou pós-manobra. Caso ocorram violações, o programa interrompe a execução, informando a natureza da violação (8).

Na terceira e última etapa foram desenvolvidos algoritmos baseados em buscas em grafos e buscas heurísticas para determinar, tão automaticamente quanto possível, um corredor de recomposição fluente, a partir da informação de sua geração com capacidade de auto-restabelecimento e da barra com a carga prioritária a ser alimentada. Estes algoritmos foram concebidos em estreita colaboração técnica com o ONS e apresentam grande potencial para desenvolvimentos adicionais.

### 3.0 - METODOLOGIA

Atualmente, tanto a elaboração de um procedimento de recomposição para novos corredores quanto a reavaliação de estratégias de recomposição para corredores já existentes, baseiam-se em um processo de tentativa e erro, fortemente influenciado pela experiência do engenheiro e pelo conhecimento que este tem da área geoeletrica a ser recomposta. No entanto, em um cenário de expansão do SIN, com alterações na distribuição de carga/geração e da topologia da rede elétrica, este processo não é o mais adequado. Nestas circunstâncias, a experiência acumulada pelo engenheiro em relação à configuração anterior do sistema elétrico pode não ser mais capaz de orientar suas escolhas. O ideal seria dispor de uma ferramenta computacional capaz de selecionar a melhor rota de recomposição possível, dentre as diversas alternativas disponíveis. Conforme destacado em (9) e devido às complexas características do problema enumeradas em (1,10) (problema inteiro/não-linear, multiobjetivo, multiestágio, de grande porte, combinatorial e sujeito a incertezas e a inúmeras

restrições não facilmente expressáveis em termos numéricos), não existe, até o momento, técnica que solucione integralmente o problema de recomposição de sistemas elétricos de potência. Assim, cabe delimitarmos as fronteiras do problema que pretendemos resolver e os dados necessários para isso, antes de apresentarmos a metodologia proposta.

O problema de seleção de uma rota de recomposição fluente consiste em determinar, a partir da geração com capacidade de auto-restabelecimento definida para o corredor em questão, uma seqüência de energização de linhas de transmissão e transformadores associados a equipamentos de suporte de potência reativa em derivação, que restabeleça o atendimento de uma carga prioritária. Esta seqüência de energizações deve ser feita de forma a observar os limites de tensão de pré-energização para as barras terminais de cada linha de transmissão ou transformador envolvido, bem como sua capacidade de carregamento. O comprimento deste caminho também deve ser reduzido, no sentido de minimizar o número de operações de chaveamento envolvidas. Finalmente, deve-se tentar minimizar a utilização de suporte de potência reativa com o objetivo de se dispor de uma reserva para o caso indisponibilidade de algum equipamento.

### 3.1 Heurísticas

Técnicas de programação heurística são comumente utilizadas para resolver problemas combinatoriais, ou seja, problemas para os quais uma solução não pode ser encontrada por métodos analíticos e envolvem a análise de um grande número de alternativas. Heurísticas podem ser definidas como sendo critérios, princípios ou métodos para decidir qual, dentre diversas alternativas, promete ser a mais efetiva no sentido de atingir um determinado objetivo. Além disso, heurísticas representam um compromisso entre a necessidade de criar um critério de escolha simples e o desejo de que este critério distinga adequadamente entre boas e más alternativas. Mesmo boas heurísticas não garantem a identificação da melhor alternativa, mas devem ser capazes de fazê-lo na maior parte das vezes. Muitos problemas complexos requerem a avaliação de uma enorme quantidade de possibilidades para se determinar uma solução exata. O tempo requerido para alcançar esta solução exata ou ótima é freqüentemente inviável do ponto de vista computacional. Heurísticas desempenham um papel fundamental neste tipo de problema, reduzindo o número de alternativas a serem analisadas e obtendo soluções sub-ótimas aceitáveis em tempos finitos (11,12). Outro aspecto fundamental na construção de algoritmos de busca heurística é a modelagem de conhecimento específico sobre o problema a ser resolvido. Este conhecimento normalmente é de difícil expressão em termos analíticos e desempenha importante papel no descarte de soluções inviáveis e na orientação do processo de busca pelo espaço de estados.

### 3.2 Espaço de Estados

O conceito de espaço de estados (11,13) é utilizado na literatura sobre algoritmos de busca heurística para expressar o universo de soluções representado pela explosão combinatorial do problema, não importando se estas soluções são viáveis ou não. Cabe ao algoritmo de busca selecionar a alternativa a ser considerada a cada instante, através de funções de avaliação heurística, e avaliar sua viabilidade. Apenas para exemplificar, consideremos a rede elétrica apresentada na FIGURA 1.

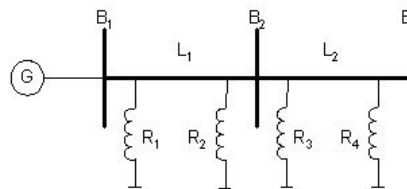


FIGURA 1 – Corredor B<sub>1</sub>-B<sub>2</sub>-B<sub>3</sub>

Suponhamos que se deseja energizar o corredor B<sub>1</sub>-B<sub>2</sub>-B<sub>3</sub> em vazio. Como as energizações são feitas trecho a trecho, este problema é, na verdade, composto por alguns subproblemas encadeados:

1. Se a tensão de B<sub>1</sub> é inferior à tensão de pré-energização de B<sub>1</sub>-B<sub>2</sub> no sentido B<sub>1</sub>→B<sub>2</sub>, energizar B<sub>1</sub>-B<sub>2</sub>.
2. Se a solução do fluxo de potência foi bem sucedida e se não ocorreram sobretensões pós-manobra em B<sub>1</sub> e B<sub>2</sub> e se a tensão de B<sub>2</sub> é inferior à tensão de pré-energização de B<sub>2</sub>-B<sub>3</sub> no sentido B<sub>2</sub>→B<sub>3</sub>, energizar B<sub>2</sub>-B<sub>3</sub>.
3. Se a solução do fluxo de potência foi bem sucedida e se não ocorreram sobretensões pós-manobra em B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> e B<sub>3</sub>, o corredor foi energizado, em vazio, com sucesso.

Este problema seria simples, não fossem as opções em termos de suporte de potência reativa proporcionadas pelos reatores de linha R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub> e R<sub>4</sub> (FIGURA 1). O grafo de espaço de estados (11) para o problema de energização do corredor B<sub>1</sub>-B<sub>2</sub>-B<sub>3</sub> pode ser visto na FIGURA 2. Este grafo é um misto de diagrama de estados (1,2,...,20) e diagrama de transição de estados, uma vez que os elementos da rede elétrica que devem ser energizados para levar o sistema a um novo estado estão posicionados como rótulos das arestas.

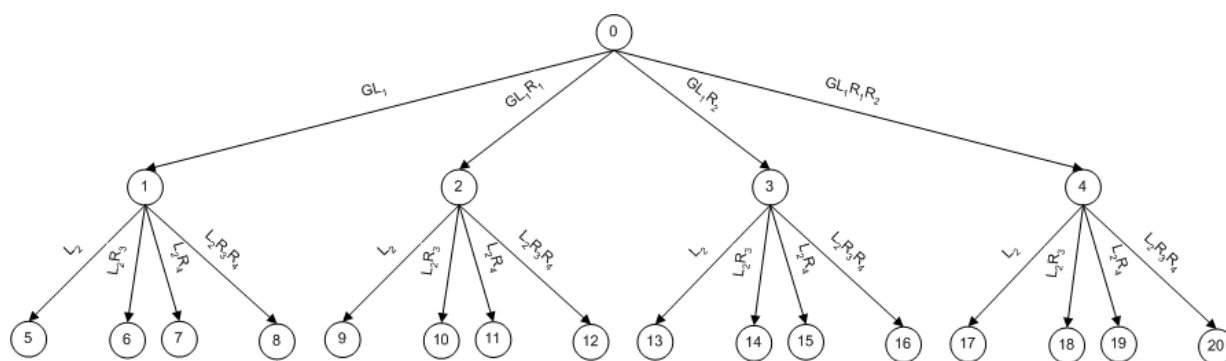


FIGURA 2 – Espaço de Estados correspondente ao corredor B<sub>1</sub>-B<sub>2</sub>-B<sub>3</sub>

À primeira vista pode parecer suficiente executar uma busca exaustiva no espaço de estados. No entanto, esta opção tem um custo computacional alto, o que fica rapidamente evidente se considerarmos corredores um pouco maiores, com diversas barras, fontes de potência reativa, ajustes de tapes, tomadas de carga intermediárias, etc. É necessário, de alguma forma podar este grafo, detectando estados inviáveis e, em função do problema com o qual estamos lidando, desconsiderar todos os subgrafos que têm estes estados como raízes. Esta abordagem não é necessariamente viável e a possibilidade de utilizá-la depende estritamente da natureza do problema e da inclusão de conhecimentos específicos sobre o mesmo no processo de geração de estados. No caso de recomposição, se, por exemplo, a energização de B<sub>1</sub>-B<sub>2</sub> utilizando a linha B<sub>1</sub>-B<sub>2</sub> e o reator R<sub>1</sub> não é viável, é desnecessário explorar os estados 9, 10, 11 e 12, que seriam os sucessores do estado 2 (FIGURA 2).

### 3.3 Algoritmo e Exemplo de Utilização

Em um estudo de recomposição, a partir dos valores limite de tensão para energização de linhas de transmissão e transformadores já existentes, obtidos nos estudos pré-operacionais de transitórios eletromagnéticos, é necessária a avaliação de sucessivas configurações de rede em um programa de fluxo de potência para garantir que a estratégia de recomposição que está sendo avaliada é factível em termos de regime permanente. Somente após esta avaliação as simulações utilizando programas de transitórios eletromecânicos são iniciadas. Eventualmente, pode ser necessária a reavaliação de alguns estudos de transitórios eletromagnéticos. É importante ressaltar que foi criado um bloco de dados específico para a introdução dos limites de tensão de pré-energização de equipamentos série, permitindo que o algoritmo leve em conta estas restrições.

Utilizando a terminologia de buscas heurísticas, o conjunto de todas as alternativas de conexão de equipamentos série e derivação, desde a usina de auto-restabelecimento até a carga prioritária a ser energizada em um processo de recomposição fluente, é denominado espaço de estados (11,13). Uma alternativa de recomposição fluente é uma seqüência de estados deste espaço. Para que uma alternativa de recomposição seja viável em termos de regime permanente, cada um dos estados que compõem esta seqüência deve corresponder a um caso de fluxo de potência que inclui todos os equipamentos série e derivação entre o estado raiz e o estado considerado, no qual os limites operacionais dos equipamentos são observados e o perfil de tensão obtido é aceitável para um processo de recomposição fluente. A avaliação de todas as alternativas de recomposição possíveis é uma abordagem não desejável, devido ao esforço computacional envolvido e à existência de estados inviáveis. Alternativas de recomposição que envolvam estados inviáveis não precisam ser avaliadas, assim como as alternativas derivadas destas. A enumeração das alternativas de energização que merecem ser investigadas é um problema combinatorial, sujeito a diversas restrições que refletem aspectos de engenharia. Algumas destas restrições reduzem significativamente o esforço computacional envolvido na solução do problema.

Do ponto de vista da teoria de grafos (14), a rede elétrica utilizada no processo de recomposição fluente é um subgrafo do grafo subjacente à rede elétrica em estudo e os estados que compõem uma alternativa de recomposição resultam da conexão de equipamentos associados a um (equipamentos em derivação) ou mais (equipamentos série) nós deste grafo. Como a energização de equipamentos em um processo de recomposição se dá da barra de geração com capacidade de auto-restabelecimento em direção à barra de carga e como a representação da rede elétrica normalmente utilizada em programas de fluxo de potência não inclui um sentido de percurso, o primeiro passo em uma metodologia para determinação automática de rotas de recomposição fluente é a determinação do sentido de percurso, ou, em outras palavras, do sentido de energização de equipamentos série. Isto pode ser obtido realizando uma busca em largura (14) no grafo subjacente à rede elétrica, partindo da geração com capacidade de auto-restabelecimento, até que a barra objetivo do corredor seja alcançada. Este procedimento gera uma árvore de largura que envolve caminhos que conectam a barra de geração à barra objetivo e a diversas outras barras que não constituem alternativa para recomposição do corredor em questão. A árvore de largura correspondente a um trecho do corredor de recomposição da Área Ilha Solteira, tendo como barra de geração a barra 501 (geração de Ilha Solteira) e como barra objetivo a barra 466 (SE Ramon Reberte Filho) pode ser observada na FIGURA 3. Os números das barras foram utilizados como rótulos dos nós.

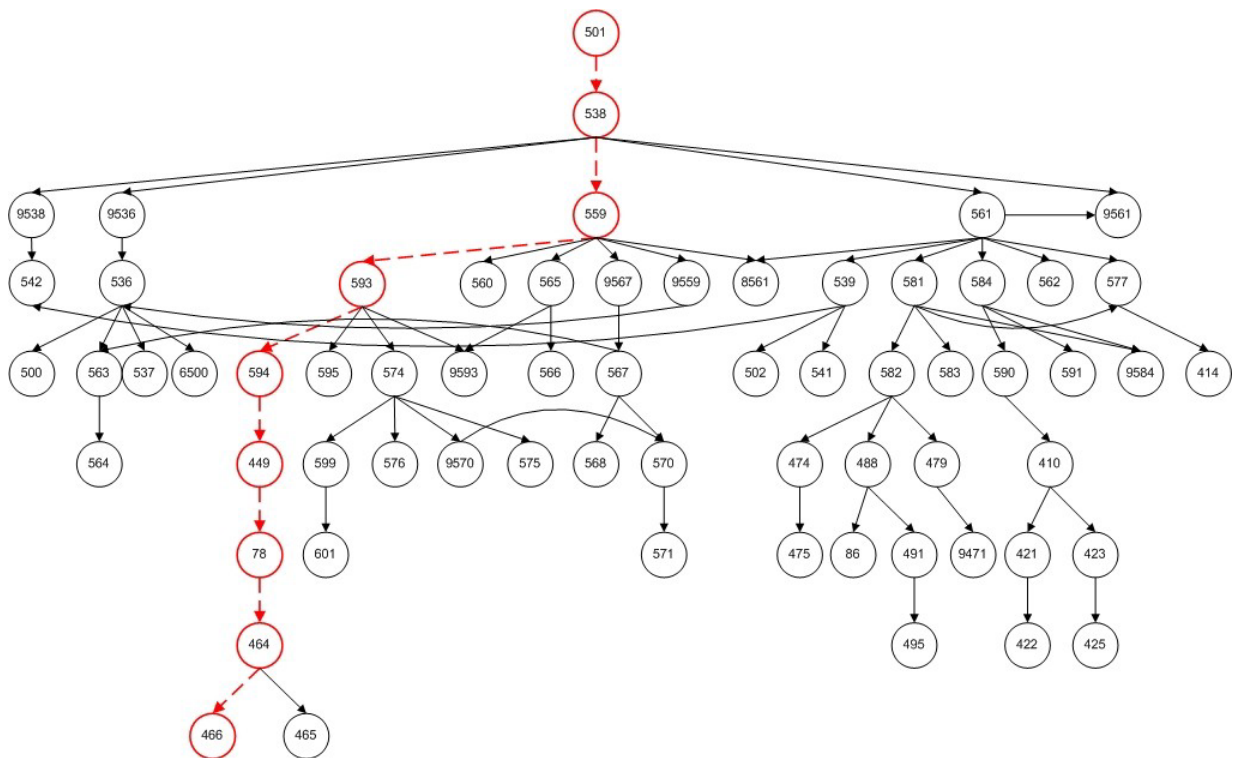


FIGURA 3 – Árvore de Largura 501-466

Esta árvore de largura precisa ser podada, de forma que restem apenas os caminhos que levam da barra de geração (501) à barra objetivo (466). Este caminho representa o conjunto de alternativas topológicas para interligação destas barras. O caminho, no entanto, não determina que conjunto de equipamentos série e derivação deve ser utilizado para efetuar esta ligação, respeitados os limites operacionais e o perfil de tensão desejado. Isto nos leva ao segundo passo do algoritmo, que é a poda da árvore de largura obtida pela busca em largura sobre o grafo subjacente à rede elétrica. Esta árvore, já podada, será utilizada para a geração, sob demanda, do espaço de estados sobre o qual será efetuada a busca por uma rota de recomposição fluente viável. A árvore de largura podada, neste caso, é representada pelo caminho tracejado (FIGURA 3).

Definido o conjunto de possíveis caminhos para interligação da barra de geração e da barra objetivo, é necessário desligar o restante da rede elétrica para iniciar o processo de determinação automática do corredor de recomposição fluente. Com a introdução do conceito de estado operativo no programa ANAREDE, é simples colocar fora de operação todas as barras e equipamentos série e derivação, com exceção da barra de geração. Esta operação constitui o terceiro passo do algoritmo, e só pode ser considerado simples devido às alterações recentemente realizadas no programa ANAREDE (7).

O quarto passo do algoritmo é a expansão recursiva dos nós da árvore de largura, dando origem aos nós do grafo de espaço de estados (FIGURA 4). Este processo de expansão embute heurísticas, como:

- priorização de alternativas com a menor alocação possível de suporte de potência reativa
- os reatores de linha são utilizados antes dos reatores de barra
- o suporte de potência reativa em terciário de transformadores de 3 enrolamentos só é empregado depois de utilizados reatores de barra e de linha

Esta priorização na utilização dos recursos do sistema para viabilizar a recomposição do corredor em vazio é alcançada de forma simples, ordenando os estados gerados. Caso nestas condições não seja possível restabelecer o corredor em vazio, o número de unidades geradoras é incrementado e o mesmo grafo de espaço de estados é novamente percorrido, com novos valores de geração. Se, mesmo assim, ainda for impossível recompor o corredor devido a sobretensões, o espaço de estados é novamente expandido, com a criação de novos estados que incluem tomadas de carga intermediárias para viabilizar a recomposição do corredor.

A expansão dos nós começa com a expansão do nó correspondente à barra de geração. Observada a priorização descrita anteriormente, primeiro são testadas as linhas de transmissão sem qualquer suporte de potência reativa. Em seguida, são testados os mesmos circuitos com reatores de linha, com reatores de barra, com reatores de linha e de barra e assim por diante. O grafo de espaço de estados para este corredor pode ser visto na FIGURA 4. Os estados foram rotulados com os números das barras acrescidos de um sub-índice para distinguir estados que alcançam a mesma barra. O rótulo 501<sub>3</sub> do estado raiz indica que estão sendo usadas três unidades geradoras

em Ilha Solteira. Os subespaços de estados derivados dos estados 593<sub>1</sub> a 593<sub>7</sub> não foram expandidos porque estes estados se mostraram inviáveis. Já os subespaços de estados derivados dos estados 593<sub>9</sub> a 593<sub>16</sub> não foram expandidos porque uma alternativa de recomposição viável foi determinada a partir da expansão de 593<sub>8</sub>.

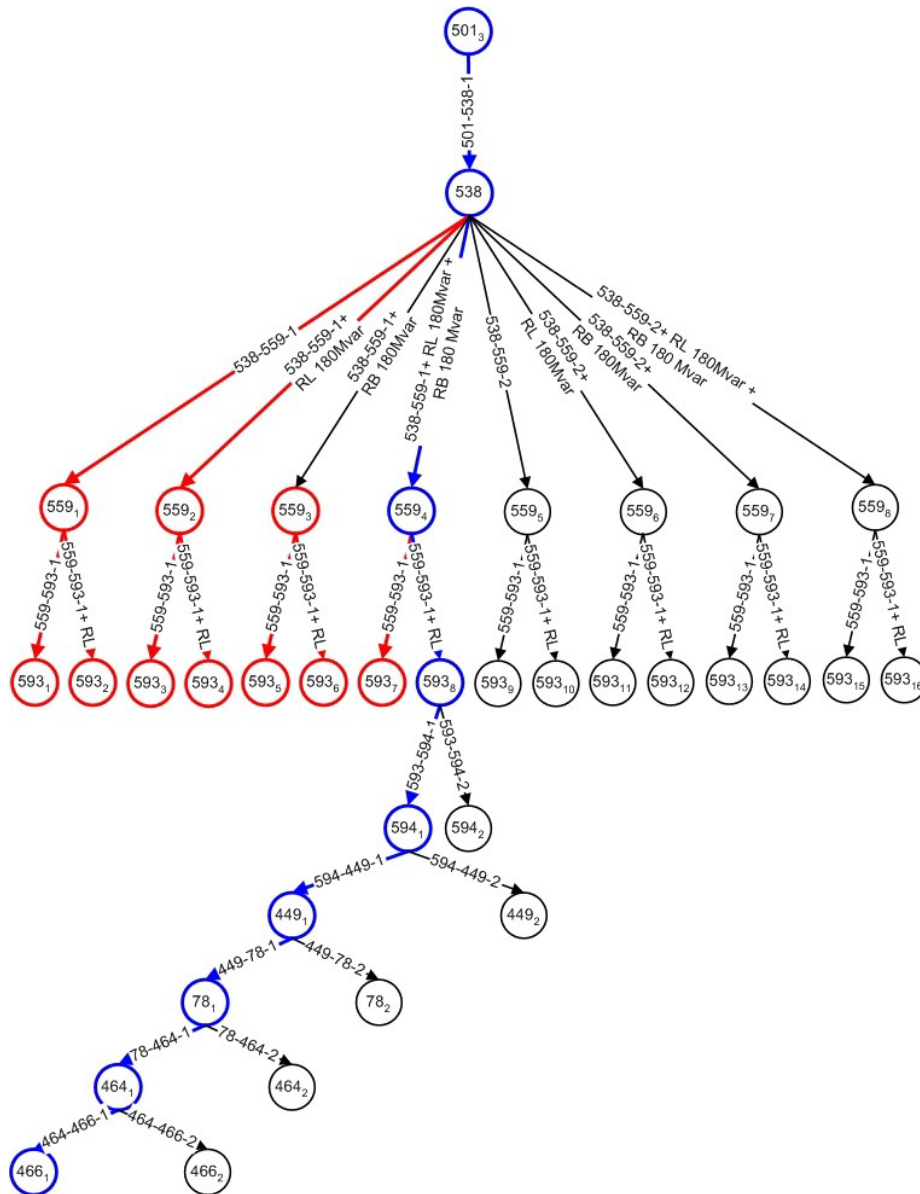


FIGURA 4 – Grafo de Espaço de Estados 501-466

Realizada a expansão do estado correspondente à usina de auto-restabelecimento, os equipamentos correspondentes ao primeiro estado filho, (linha de transmissão ou transformador e sua barra terminal) são incorporados à rede elétrica, com estado operativo ligado. Esta nova rede é avaliada, através da execução do fluxo de potência. Se o fluxo de potência for bem sucedido e se não forem verificadas sobretensões, o nó correspondente, na árvore de largura, à barra terminal do equipamento série conectado, é expandido recursivamente. Se, em algum ponto deste processo recursivo, o fluxo de potência não alcançar convergência ou ocorrerem sobretensões, o estado é marcado como inviável e o próximo estado não testado no mesmo nível é testado, enquanto existirem estados não testados neste nível. Uma vez esgotados os estados não testados neste nível, o processo retorna à última chamada recursiva e, neste nível, testa o próximo estado não explorado, e assim por diante. Caso se esgotem os estados não testados sem que a barra objetivo seja alcançada, significa que não existe possibilidade de energização em vazio do corredor sob análise.

A função de avaliação heurística utilizada considera simplesmente o suporte de potência reativa associado a circuitos e barras. O fluxo de potência desempenha o papel de função de avaliação de viabilidade, que também poderia ser desempenhado por outros métodos de análise de redes, como, por exemplo, transitórios eletromecânicos. No entanto, é desejável que o cálculo da função de avaliação heurística e da função de avaliação de viabilidade tenham baixo custo computacional. Por isso decidiu-se pela utilização do fluxo de potência, deixando a análise de transitórios eletromecânicos para uma etapa posterior, já com o corredor definido.

#### 4.0 - FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

A metodologia desenvolvida apresentou bons resultados na determinação das condições para recomposição de um corredor fluente, composto de uma usina de auto-restabelecimento e uma barra objetivo. Neste estágio de desenvolvimento do algoritmo, são utilizados o suporte de potência reativa de reatores de barra, reatores de linha e reatores em terciários de transformadores de três enrolamentos e tomadas de carga intermediárias com o objetivo de manter a tensão dentro dos limites especificados. A alocação de novas unidades geradoras para compensar as linhas em carga leve também está contemplada. No entanto, outros desenvolvimentos estão em andamento para agregar novas facilidades a este módulo do programa ANAREDE, utilizando como base a infraestrutura já criada. Dentre estes desenvolvimentos, destacam-se especificação de equipamentos indisponíveis, ajuste automático da tensão da geração e especificação das cargas a serem energizadas durante e após a determinação do corredor em vazio.

#### 5.0 - CONCLUSÕES

Avaliação e reavaliação de procedimentos de recomposição são atividades contínuas e, para que seus resultados sejam gerados em tempo hábil, é necessário reduzir o esforço despendido pelas equipes de estudo para sua execução. Tal redução viabiliza a análise de um número maior de alternativas de recomposição, tornando as instruções operativas mais flexíveis. A metodologia implementada agiliza os estudos de fluxo de potência relacionados com a elaboração de procedimentos de recomposição. Mais do que utilizar ordenadamente os equipamentos disponíveis, investigar o espaço de estados de forma sistemática e determinar automaticamente corredores de recomposição fluente, com seus trechos e as manobras associadas a cada trecho, a metodologia é capaz de gerar o conjunto de dados que descreve estes corredores. Este conjunto de dados pode ser utilizado na reavaliação futura dos corredores frente a alterações de topologia e distribuição de carga e geração.

Os corredores de recomposição determinados pela metodologia implementada deverão ser objeto de validação em termos de transitórios eletromecânicos, como é habitual em estudos de recomposição. Os ganhos oferecidos pela metodologia incluem o tratamento adequado do aspecto combinatorial, a automação de boa parte do processo de análise de viabilidade em termos de regime permanente, a validação através de fluxo de potência e a geração automática do conjunto de dados que descreve os trechos do corredor de recomposição. Outro ganho importante é a “imunidade” da metodologia a alterações de topologia e de distribuição de carga e geração do sistema em estudo, o que não ocorre com estratégias baseadas em sistemas especialistas.

#### 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) WU, F.F., MONTICELLI, A.J., “Analytical Tools for Power System Restoration – Conceptual Design”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, Issue 1, February, 1988, pp. 10-26.
- (2) MOTA, L.T.M., *Métodos de Previsão do Comportamento da Carga na Recomposição de Sistemas de Energia Elétrica*, Tese de D.Sc., Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil, 2005.
- (3) 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)
- (4) GOMES, P., GUARINI, A. P., LIMA, A. C. S, SOARES, M., “Analysis of Restoration Proceedings in the Brazilian Power System”, VIII SEPOPE, 2002, Brasília.
- (5) GOMES, P., GUARINI, A. P., LIMA, A. C. S, GUARINI, M.C., “Otimização Do Processo De Recomposição Para O Sistema Interligado Nacional”, XVII SNPTEE, Outubro/2003, Uberlândia (MG), Brasil.
- (6) CEPEL, Relatório Técnico DP/DPP – 30875/2006, “Programa de Análise de Redes – ANAREDE V09.00.00 - Manual do Usuário”.
- (7) 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.
- (8) GUARINI, A. P., SOUZA, L. M., HENRIQUES, R. M., PASSOS Fº, J. A., ALVES, F.R.M., “Estudos Automatizados de Recomposição do Sistema Interligado Nacional Utilizando Novas Facilidades Computacionais do Programa ANAREDE”, XIX SNPTEE, Outubro/2007, Rio de Janeiro (RJ), Brasil.
- (9) SANTOS, J.V.C, CECHIN, A.L., GÓMEZ, A.T., OSÓRIO, F.S., GARCIA, A.V., “Contribuições para a Solução do Problema de Restauração de Sistemas de Potência: Investigação do Uso de Algoritmos Genéticos e Aplicação de Processamento Distribuído”, XV CBA, Gramado, RS, Brasil, Setembro/2004
- (10) ADIBI, M. M., *Power System Restoration – Methodologies & Implementation Strategies*, IEEE Press Series on Power Engineering, 2000.
- (11) PEARL, J., 1984, *Heuristics: Intelligent Search Strategies for Computer Problem Solving*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- (12) MORELATO, A. L., MONTICELLI, A. J., “Heuristic Search Approach to Distribution System Restoration”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 4, October, 1989, pp. 2235-2241.
- (13) GLOVER, F., LAGUNA, M., 1997, *Tabu Search*, Kluwer Academic Publishers
- (14) SWARCFITER, J. L., *Grafos e Algoritmos Computacionais*, Editora Campus Ltda, 1984.