



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

FI/GOP/19  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

**GRUPO – IX**

**GRUPO DE ESTUDO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GOP**

**UMA TÉCNICA INOVADORA PARA GERAÇÃO AUTOMÁTICA DE MANOBRAS COMPLEXAS**

**Renato Freitas, Pedro Nicolletti,  
Jacques Sauvé**

**Eloi Rocha Neto (\*)**

**Denilson S. dos Santos**

**UFCG**

**Smartiks**

**CHESF**

**RESUMO**

A geração manual de manobras possui dois problemas inerentes: (1) requer tempo considerável na elaboração; (2) é altamente suscetível a erros. Instruções geradas incorretamente podem causar sérias consequências ao sistema elétrico. Além disso, o atraso na execução da manobra acarreta prejuízos na receita da empresa. É apresentada nesse artigo uma solução inovadora, capaz de gerar manobras complexas automaticamente para qualquer subestação da rede, com baixo esforço de manutenção. Resultados de validação indicam que a solução gerou manobras com 100% de corretude. Um sistema prova-de-conceito desenvolvido no trabalho está sendo integrado a uma plataforma integrada para auxílio à operação da CHESF.

**PALAVRAS-CHAVE**

Automatização de Subestações; Geração de Manobras.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Manobras são sequências de instruções operacionais e administrativas executadas com a finalidade de reconfigurar a rede elétrica para que não haja interrupção no fornecimento de energia, mesmo durante a manutenção de equipamentos ou na eventualidade de anomalias elétricas [2]. O objetivo específico de cada manobra varia de tarefas de baixa complexidade, como desenergizar, isolar e aterrar uma linha de transmissão para manutenção preventiva, até tarefas de alta complexidade, como reenergizar esta mesma linha de transmissão quando seu disjuntor principal encontra-se fora de serviço.

Ao planejar uma manobra, diversos aspectos devem ser considerados, a exemplo do estado operacional dos equipamentos, os esquemas de proteção do arranjo de barramento, as regras de intertravamento implementadas, limites operacionais etc. A tarefa complexa de gerar uma manobra é normalmente realizada **manualmente**, por seres humanos. No contexto da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF), uma das maiores companhias de Geração e Transmissão de Energia Elétrica do Brasil, os operadores e supervisores da operação são responsáveis por gerar manobras manualmente nos setores de pré-operação e operação em tempo real.

O processo manual de geração de manobras implica em dois problemas essenciais: a demora no processo de criação e análise e a alta suscetibilidade a erros – decisões tecnicamente incorretas ou até mesmo erros de digitação. Executar manobras errôneas pode introduzir falhas que podem comprometer a segurança elétrica na operação do Sistema Interligado Nacional. Além disso, em situações de urgência, quanto maior o tempo gasto na geração da manobra, maior o prejuízo financeiro associado à interrupção do fornecimento de energia.

Diante dos problemas apresentados, foi desenvolvida uma técnica para geração automática de manobras. A técnica em questão visa a atenuar o problema da geração manual de manobras por (i) minimizar o tempo de geração e a probabilidade de ocorrência de erros; (ii) aumentar a confiabilidade das manobras que serão executadas, garantindo assim a segurança do sistema elétrico.

Entre as principais características da solução, destacam-se: (i) extração de conhecimento sobre a topologia e os estados dos equipamentos em tempo real, através de um sistema SCADA/EMS; (ii) uso de algoritmos independentes do arranjo topológico; (iii) regras de intertravamento inferidas a partir da topologia, aplicando conhecimento dos princípios elétricos de cada equipamento e da configuração da proteção; (iv) esquemas de transferência da proteção identificados automaticamente. Como resultado dessas características, a solução pode lidar com quaisquer arranjos de subestação de forma genérica. Além disso, a técnica exige baixo esforço de manutenção, visto que a necessidade de configuração manual é mínima: se um novo *bay* ou até mesmo uma nova subestação for adicionada à rede, por exemplo, nenhuma configuração por parte dos operadores será necessária para que manobras sejam geradas sobre os novos equipamentos. Essas são as inovações fundamentais do trabalho, as quais facilitam a sua adoção em quaisquer subestações ou centros de controle do sistema elétrico.

Um sistema prova-de-conceito - chamado Smart Switch - foi validado em sessões de treinamento junto a especialistas na geração de manobras da CHESF. A validação indicou boa cobertura da técnica sobre cenários típicos e atípicos de manobras. As sequências de instruções geradas mostraram-se eletricamente corretas, com pequenas divergências devidas exclusivamente à decisões administrativas da companhia. Os resultados também apontaram boa aceitação dos usuários à ferramenta, sugerindo que esta deverá contribuir com a segurança elétrica na operação.

O desenvolvimento da ferramenta possibilitou a geração automática de manobras complexas nos Centros de Operação do sistema elétrico, seja para propósitos de treinamento de novos operadores ou para uso efetivo na operação do sistema. Entre os principais ganhos oferecidos pela ferramenta, destacam-se (i) a redução no tempo de geração das manobras e (ii) aumento da confiabilidade das manobras geradas.

Atualmente, o Smart Switch está integrado ao Smart Alarms, o que simplifica o acesso e implantação do sistema em toda empresa.

## 2.0 - GERAÇÃO AUTOMÁTICA DE MANOBRAS COMPLEXAS

O problema da geração automática de manobras consiste em determinar a sequência de operações para realizar uma tarefa específica da subestação. Em trabalhos prévios [3, 4], discutiu-se os requisitos fundamentais de uma solução para o problema, a saber:

1. Informações relevantes para a geração das manobras (e. g. configuração da topologia e estados dos equipamentos) devem refletir o atual estado da rede;
2. A solução deve assegurar a proteção do sistema elétrico, avaliando regras de intertravamento aplicáveis a todas as subestações do sistema;
3. A técnica deve ser aplicável a qualquer arranjo de barramento, sem demandar alterações adicionais;
4. A solução deve demandar nenhum ou pouco de manutenção, logo configurações manuais e particulares de cada subestação devem ser mínimas;
5. A solução deve gerar manobras em até 5 segundos, até mesmo em subestações consideradas grandes (com milhares de equipamentos);
6. A técnica deve gerar manobras estritamente corretas do ponto de vista elétrico. Se não for possível gerar uma manobra confiável para o objetivo requisitado, a solução deve notificar os interessados.

O escopo da solução está restrito à geração de instruções de seccionamento, aterramento e transferência da proteção, consideradas as classes de instrução mais importantes em uma manobra. Instruções adicionais, como operações de controle (e. g. ajuste de tape) e diretrizes administrativas (e. g. contactar o Centro de Operação), devem ser inseridas manualmente após a geração da manobra.

### 2.1 Informações da rede obtidas em tempo-real

A solução desenvolvida foi arquitetada de forma a obter informações em tempo-real sobre a rede elétrica diretamente de outros sistemas existentes na companhia.

A Figura 1 ilustra a arquitetura da solução. A configuração topológica da rede é extraída do sistema Smart Alarms. O Smart Alarms é capaz de montar um grafo representando a topologia da rede utilizando os dados mais recentes fornecidos pelo SAGE, sistema SCADA/EMS da CHESF. De forma análoga obtêm-se os estados operacionais dos equipamentos que são relevantes para a geração de manobras (e. g. disponibilidade e nível de tensão). Ambas as informações são fundamentais para determinar a sequência de operações da manobra.

Além disso, ao remover um disjuntor de operação, a função de proteção do disjuntor principal deve ser transferida para o disjuntor de transferência, a fim de preservar as zonas de proteção existentes. Devido à diversidade de tipos de esquema de transferência da proteção de disjuntor na CHESF, essa informação não pode ser generalizada. À vista disso, optou-se por identificar os esquemas através da leitura dos Roteiros de Manobra dos disjuntores. Para ler e interpretar os roteiros de manobra foi necessária a integração da solução com outro sistema da companhia, chamado SisRTM (Sistema de Roteiro de Manobras).



FIGURA 1 – Arquitetura da solução

## 2.2 Regras de intertravamento genéricas

Regras de intertravamento baseadas na topologia, propostas por Brand *et. al.* [5], desacoplam o conhecimento elétrico da implementação do sistema. Baseado nesta estratégia, a solução avalia princípios elétricos básicos de cada dispositivo de seccionamento através de verificações na topologia. As regras de intertravamento consideradas independem da subestação ou do equipamento envolvido, sendo portanto aplicáveis a todas as subestações (i. e. subestações novas não irão exigir configuração manual).

Os princípios elétricos considerados neste trabalho podem ser vistos em maior profundidade nos trabalhos [3, 4, 7]. De forma geral, a base teórica que fundamenta as regras de intertravamento implementadas baseiam-se em três dispositivos distintos: chaves de isolamento, chaves de aterramento e disjuntores.

- Chaves de isolamento: busca-se garantir que estas não irão criar ou interromper fluxo de corrente; ou propagar falhas no sistema [6]. Para determinar se a chave pode ser manipulada, a solução verifica se há corrente fluindo através da chave ou se haverá corrente fluindo após o fechamento desta. Caso existam possíveis caminhos alternativos para o fluxo de corrente, estes também serão considerados (exceto para subestações de alta tensão<sup>1</sup>).
- Chaves de aterramento: antes de aterrar um equipamento, deve-se verificar se este está isolado adequadamente [6]. Assim, a única restrição a considerar para chaves de aterramento é a verificação, antes de um fechamento, se o equipamento relacionado à chave está devidamente isolado.
- Disjuntor: fechar um circuito aterrado gera falhas graves causadas pelo excessivo fluxo de corrente na terra [6]. Esta falha pode danificar equipamentos e ferir pessoas envolvidas na execução da manobra. Por essa razão, um disjuntor não pode ser fechado caso possa criar um circuito aterrado.

Por fim, dispositivos fora de operação<sup>2</sup> não podem ser manipulados.

## 2.3 Algoritmos independentes do arranjo topológico das subestações

Para gerar manobras para diferentes tipos de arranjo de barramento sem utilizar configurações individuais ou ajustes manuais nos algoritmos, a técnica deste trabalho usa algoritmos baseados em Teoria dos Grafos. Os algoritmos exploram o grafo da topologia fornecido pelo Smart Alarms com a ajuda de através de mecanismos clássicos de pesquisa em grafo, como o *Depth-First Search* (DFS) e o *Breadth-First Search* (BFS), os quais demandam baixo tempo computacional e por isso não afetam a escalabilidade da solução.

No exemplo da Figura 2, uma manobra para liberar o disjuntor 12J6 para manutenção deve ser gerada. Considerando que a linha de transmissão 02J6 está operando normalmente, é preciso executar uma pesquisa no grafo com o intuito de encontrar um caminho alternativo para o fluxo de corrente existente. O resultado da pesquisa está destacado na imagem entre os pontos de conexão 1 e 2.

<sup>1</sup> Para evitar perturbações na proteção, de acordo com normas de operação da CHESF.

<sup>2</sup> Um equipamento é considerado fora de operação quando apresenta defeito no funcionamento, encontra-se em manutenção, não pode ser usado por decisões administrativas, entre outros.

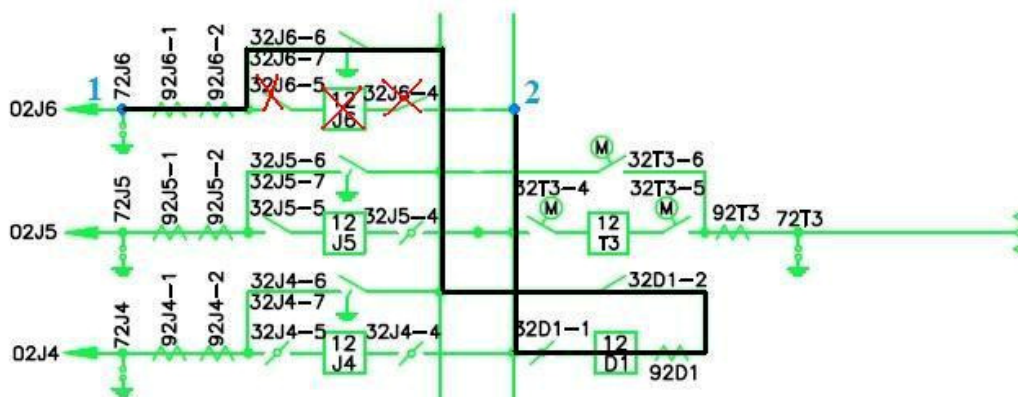


FIGURA 2 – Algoritmo de geração de manobra.

Encontrado o caminho, é preciso conectá-lo respeitando regras de intertravamento de ordenação, para finalmente abrir e isolar o disjuntor. A manobra gerada pela solução neste cenário consiste na seguinte sequência:

1. Fechar 32J6-6.
2. Fechar 12D1.
3. Abrir 12J6.
4. Abrir 32J6-4.
5. Abrir 32J6-5.

O uso de algoritmos e regras de intertravamento genéricas (Seção 2.2) habilita a técnica a gerar manobras corretas para quaisquer arranjos de subestação, com esforço mínimo de manutenção. Se um novo bay for introduzido na rede, por exemplo, nenhuma alteração será necessária nos algoritmos para gerar manobras sobre os equipamentos inseridos.

## 2.4 Manobras estritamente corretas

Conforme descrito no Requisito 6, o gerador de manobras não pode cometer erros. Visto que não há solução conhecida na literatura para identificar com total precisão a corretude de uma manobra, é necessário recorrer à avaliação humana. Sendo assim, para garantir que ninguém consiga gerar uma manobra incorreta utilizando a técnica, foi implementado um mecanismo simples para identificar e bloquear a geração de manobras em cenários onde a técnica falhe.

O mecanismo implementado consiste em cadastrar padrões onde sabe-se que a técnica falha – configuração feita uma única vez. Atualmente, só é necessário bloquear a geração de manobra para dois tipos de cenário: (i) quando a manobra precisa de informações que não estão disponíveis nas fontes de dados utilizadas (Smart Alarms e SisRTM) e (ii) quando a manobra envolve um arranjo de barramento para o qual o algoritmo de geração automática não esteja apto para gerar manobras.

Além deste mecanismo, foi necessário utilizar um processo de validação e verificação forte, de modo a garantir a corretude da solução para cada classe de manobra que a técnica cobre. A metodologia utilizada será visto na Seção 3.

### 2.4.1 Detecção de erros de modelagem na topologia

Algoritmos baseados em Teoria dos Grafos requerem modelagem precisa da rede elétrica. Qualquer problema de modelagem na topologia pode resultar em falhas no caminhamento do grafo e introduzir erros nas manobras.

Os erros de modelagem mais comuns encontrados no sistema EMS implantado na companhia incluem: i) equipamentos não modelados e ii) conexões erradas entre equipamentos. Embora não seja possível corrigir essas limitações automaticamente, é possível tratá-las e auxiliar os responsáveis pela modelagem identificando inconsistências na topologia. A abordagem apresentada identifica automaticamente os equipamentos não-modelados e conexões erradas entre disjuntores e chaves existentes.

Usuários da solução tem acesso a todas as inconsistências detectadas, para que estas possam ser corrigidas quando possível. Problemas críticos na topologia, quando existentes, são informados antes da geração da manobra naquela subestação. É importante observar que essas medidas são apenas soluções alternativas para o problema. Para perfeito uso da técnica abordada neste trabalho, problemas de modelagem devem ser resolvidos diretamente no sistema SCADA/EMS.

## 3.0 - METODOLOGIA DE VALIDAÇÃO

Para validar este trabalho, foi desenvolvido um sistema prova-de-conceito, chamado Smart Switch, implementando a técnica comentada na Seção 2. A validação foi conduzida em parceria com a CHESF durante projeto de P&D. Especialistas na geração de manobra auxiliaram a validação avaliando as manobras geradas pelo Smart Switch. A metodologia utilizada pode ser resumida em 7 passos:

1. Definição dos cenários de avaliação: um conjunto de cenários de manobra é selecionado pelo time de pesquisa, envolvendo diversas subestações e arranjos de barramento da rede;
2. Seleção dos especialistas: um grupo de especialistas na geração de manobras da CHESF é selecionado para avaliar a técnica utilizando o Smart Switch. A seleção foi feita pela CHESF, sem qualquer interferência do time de pesquisa.
3. Treinamento: os especialistas selecionados são treinados para utilizar o Smart Switch, a fim de evitar ruídos nas avaliações causados por uso incorreto do sistema;
4. Distribuição de cenários: cada especialista recebe uma parcela dos cenários selecionados no passo 1. A distribuição é feita de acordo com o centro regional dos avaliadores.
5. Avaliação: o especialista usa o Smart Switch para gera a manobra e avalia o resultado, fornecendo feedback sobre sua correteza e completude. Caso algum erro seja detectado, ele deve indicar ainda qual instrução foi gerada incorretamente e/ou qual deveria ser a sequência de instruções correta;
6. Análise: o time de pesquisa coleta todas as análises realizadas e discute as mudanças a realizar internamente;
7. Evolução: o time de pesquisa, por fim, usa o feedback fornecido pelos avaliadores para evoluir a técnica, com o intuito de cobrir as solicitações e sugestões dos especialistas.

#### 4.0 - RESULTADOS

O último ciclo de validação seguindo a metodologia comentada na Seção 3 foi concluído em Outubro de 2013, após 2 meses de avaliação executada por especialistas na geração de manobras designados pela CHESF. O objetivo deste ciclo foi avaliar a geração de manobras de alta complexidade operacional, as quais não estão descritas nos documentos normativos da companhia. Entre outras, destacam-se as seguintes categorias:

- Liberação de disjuntor impedido;
- Liberação / normalização de chaves de seccionamento;
- Liberação de chaves de seccionamento impedidas;
- Liberação / normalização de linha de transmissões e transformadores cujo disjuntor principal está fora de operação.

Além do treinamento mencionado na Seção 3, um manual de uso do sistema e diretrizes de avaliação foram fornecidos aos especialistas. Os avaliadores, seguindo as diretrizes, geraram manobras automaticamente para cada cenário e em seguida escreveram um pequeno relatório contendo a análise crítica da manobra gerada. Os feedbacks avaliaram a correteza e completude da técnica.

Ao todo, 24 relatórios foram submetidos pelos especialistas até o fim do ciclo. As análises mostraram que todas as manobras geradas estavam corretas do ponto de vista elétrico. Apesar do excelente resultado de correteza das manobras, algumas das manobras não atendem, na versão atual, certos padrões de cada Centro Regional da CHESF. Cada regional pode tomar diferentes decisões na geração de uma mesma manobra, o que pode criar um conflito. Um exemplo clássico deste conflito é a simples tarefa de isolar um transformador desenergizado: certas regionais podem optar por abrir a chave de isolamento localizada mais perto do equipamento, enquanto outra pode, por razões de segurança, abrir a chave localizada depois do disjuntor. Por hora, optou-se por implementar, no Smart Switch, a estratégia que provê maior segurança.

Estes resultados de validação, somados aos resultados positivos das versões preliminares do trabalho [4], mostram que a técnica desenvolvida pode ser utilizada em um contexto real (i. e. uma companhia de Geração e Transmissão de Energia Elétrica real), tanto para propósitos de treinamento quanto pela operação em tempo real. Ainda assim, como a técnica ainda não gera manobras completas, certas instruções deverão ser manualmente inseridas na ferramenta.

Recentemente, o Smart Switch foi integrado à ferramenta de visualização e monitoramento de diagnósticos em tempo real da CHESF, o que possibilita sua expansão dentro da companhia. A integração com o Smart Switch permitiu transformar o Smart Alarms em uma plataforma integrada para auxílio à operação. Através dela, operadores podem visualizar os diagramas do SCADA em tempo real, diagnosticar problemas em equipamentos e causa raiz de uma perturbação, gerar manobras de liberação e normalização de equipamentos considerando restrições operacionais, exportar a manobra gerada para o SisRTM, e, por fim, executar a manobra em um ambiente integrado ao SCADA. Essas características fazem do Smart um ambiente diferenciado, com alto grau de inovação e único no setor elétrico nacional.

#### 5.0 - SMART SWITCH

Além da ferramenta de geração automática de manobras proveniente da técnica (Figura 3), o Smart Switch oferece algumas funcionalidades adicionais, incluídas para facilitar o processo de validação e usabilidade do operador, entre as quais se destacam:

- Geração de manobras manual: permite que cada ação da manobra seja inserida manualmente através de cliques de mouses. Ações de abertura e fechamento de disjuntores e chaves, por exemplo, podem ser inseridas com um único clique no equipamento. É importante perceber que o estado visual do unifilar (informação gráfica de abertura e fechamento) é atualizado juntamente com a manobra em construção, assim, os efeitos da inserção de uma abertura de um disjuntor na manobra são repercutidos no diagrama unifilar apresentado na ferramenta. A Figura 3 ilustra essa funcionalidade.
- Exportar manobras para o SisRTM: permite exportar uma manobra gerada no Smart Switch para dentro do SisRTM, onde poderá ser acessada pelos operadores.
- Salvar fotografias do sistema elétrico: a geração de uma manobra utiliza como base o estado atual do sistema elétrico, esse estado pode ser salvo para posterior consulta ou geração automática de uma manobra através do Smart Switch.
- Agendar a geração de fotografia: as fotografias podem ser retiradas sob demanda ou agendadas.
- Comandos fazer/desfazer: cada ação realizada durante a criação de uma manobra poderá ser desfeita e refeita.
- Configurar o estado de equipamentos não supervisionados: o estado dos equipamentos não supervisionados podem ser ajustados manualmente e salvos, isso é importante para a qualidade da manobra a ser gerada.
- Zoom e Panning: os diagramas apresentados na interface do Smart Switch podem ser aproximados e arrastados com o mouse, o que gera uma experiência fantástica com para o usuário.
- Navegação visual em todos os unifilares da empresa visualizando dados do tempo real ou de uma fotografia retirada do passado. Ver Figura 4.
- Visualizar o estado inicial e final de uma manobra: permite visualizar em um diagrama unifilar o estado dos disjuntores e chaves antes e após uma manobra.

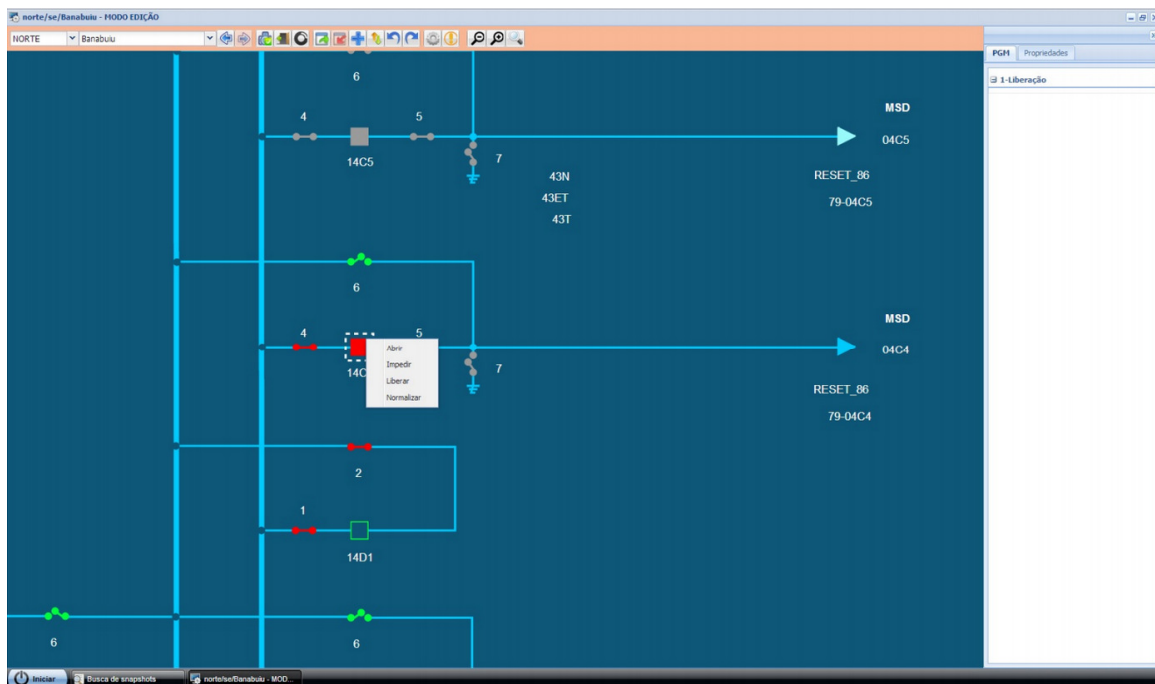


FIGURA 3 – Interface de geração de manobras manual, na tela do diagrama unifilar.

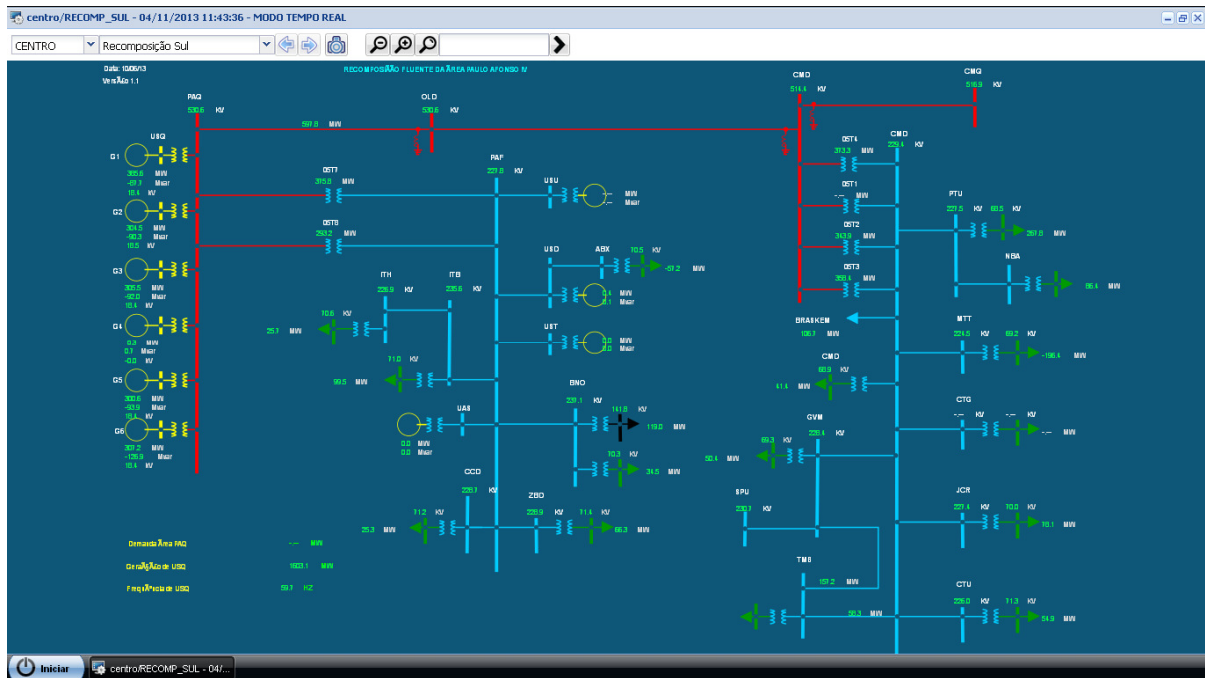


FIGURA 4 – Navegação visual em diagrama unifilar, com dados em tempo real.

- Auditar Roteiros de Manobras e Programas de Manobras existentes no SisRTM. Permite detectar eventuais problemas nos roteiros e programas de manobras já existentes na CHESF.
- Módulo de treinamento: esse módulo permite que instrutores adicionem descrições de manobras a serem realizadas para que os treinandos, através do Smart Switch, criem as manobras automaticamente ou manualmente. Além disso, o instrutor poderá visualizar as manobras geradas pelos treinandos e enviar um feedback.

O Smart Switch foi desenvolvido em Java. A interface gráfica é totalmente baseada em JavaScript e foi implementada utilizando o framework Sencha GXT. O banco de dados utilizado foi o MySQL.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) BRAND, K.-P.; LOHMANN, V.; WIMMER, W. "Substation automation handbook". Utility Automation Consulting Lohmann, 2003.
- (2) CRISPIM, C. F. "Geração Automática de Manobras para Sistemas Eletroenergéticos". Universidade Federal de Campina Grande, 2013.
- (3) CRISPIM, C. F.; SAUVÉ, J.; NICOLLETTI, P.; DOS SANTOS, D. S.; NETO, E. R. "A Zero-Maintenance System to Automatically Generate Substation Switching Sequences". PAC World Conference – Latin America (2012): 1-12.
- (4) FREITAS, R. A.; CRISPIM, C. F.; SAUVÉ, J.; NICOLLETTI, P.; DOS SANTOS, D. S.; NETO, E. R. "Automatic generation of substation switching sequences". CIGRÉ Lisbon Symposium, 2013.
- (5) KOPAINSKY, J.; WIMMER, W.; BRAND, K. "Topology-based interlocking of electrical substations". IEEE Transactions on Power Delivery, 1986.
- (6) DHAKAL, P. "Computer aided design of substation switching schemes". Diss. 2000.
- (7) FREITAS, R. A. "Geração de Manobras Finais de Recomposição de Subestações do Sistema Elétrico". Universidade Federal de Campina Grande, 2015.

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

**ELOI ROCHA NETO** é Mestre em Informática pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e graduado pela mesma instituição. Diretor da Smartiks Tecnologia da Informação.

*E-mail:* eloi@smartiks.com  
*Fone:* (83) 8868-7025

**RENATO ALMEIDA** é Mestrando em Informática pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e graduado pela mesma instituição.

*E-mail:* renato@smartiks.com  
*Fone:* (83) 8124-1008