

Implementação de um Sistema de Diagnóstico de Falta para Subestações Baseado em Redes de Petri

José Roberto Bezerra (roberto@dee.ufc.br); Marcos A.S. Caetano (caetano@dee.ufc.br); José Renato B. Sousa (renato@cefetce.br); Raimundo Furtado Sampaio (rfurtado@coelce.com.br); Giovanni C. Barros (ogcb@fisica.ufc.br); Ruth P.S. Leão (leao@dee.ufc.br); Eudes Barbosa de Medeiros (eudes@coelce.com.br); José Wilson Barreto Oliveira (wilsonba@coelce.com.br); Marcus Superbus de Medeiros (superbus@coelce.com.br)

RESUMO

Nos últimos anos os sistemas elétricos de potência sofreram grandes mudanças. A digitalização e a informatização das concessionárias trouxeram mudanças na forma de administração e operação. Ao mesmo tempo que o uso dos sistemas de informação trouxe avanços na disponibilização de informações que antes eram difíceis ou mesmo inacessíveis, também criou um volume de dados que pode inviabilizar seu aproveitamento com a eficiência que deveria. Este artigo apresenta uma breve introdução a uma metodologia para desenvolvimento de Sistemas de Diagnóstico de Falta (SDF) para Subestações (SE) baseada em Redes de Petri (RP). São apresentados o desenvolvimento e os resultados de um SDF para a SE Beberibe, integrante do sistema elétrico de potência da Companhia Energética do Ceará, COELCE. O SDF desenvolvido utiliza-se das informações disponibilizadas pelo sistema SCADA da SE para facilitar a análise da grande quantidade de eventos e alarmes que são apresentados ao operador no momento de uma falta.

PALAVRAS-CHAVE:

Diagnóstico de falta, Redes de Petri, Sistemas de potência

I. INTRODUÇÃO

A última década trouxe diversas inovações tecnológicas advindas da intensa utilização de sistemas de informação que se popularizaram neste período. Dentro do objetivo de manter um nível de atendimento adequado aos consumidores e operar o sistema de forma econômica e segura os sistemas de informação passaram a desempenhar um papel fundamental nas concessionárias de energia elétrica [2, 3]. Auxiliando a obter e disponibilizar informações adequadas e confiáveis não apenas aos setores operacionais, mas sim para toda a empresa. Tornando possível aumentar os níveis de segurança e de produtividade, reduzir índices de interrupção no fornecimento (DEC e FEC), otimização dos recursos humanos e materiais dentre outras vantagens.

Porém a utilização dos sistemas de informação e

automação gerou uma quantidade de informações que, muitas vezes, não são bem aproveitadas. É o caso dos sistemas digitais utilizados na automação das subestações (SE). Os modernos sistemas de potência são monitorados por Sistemas de Supervisão Controle e Aquisição de Dados (SCADA) [7]. Os sistemas SCADA são capazes de registrar eventos como abertura de chaves ou disjuntores, atuação de relés, falha de dispositivos, gerenciamento de carga, dentre outros. A quantidade de alarmes que é apresentada ao operador no momento de uma ocorrência é tal que prejudica sua análise para que possa restabelecer o sistema com segurança.

Este trabalho apresenta a utilização de redes de Petri no desenvolvimento de um sistema de diagnóstico de falta (SDF) para análise das informações advindas do SCADA da subestação Beberibe. SDF é uma função avançada de automação de sistemas elétricos que funciona integrada ao sistema supervisor SCADA, executando diagnósticos de faltas e emitindo para o operador um relatório de diagnóstico com informações precisas e sucintas. Nesse contexto, falta é a ocorrência acidental e súbita, ou defeito, em um elemento de um sistema elétrico, que pode resultar em falha do próprio elemento e/ou de outros elementos associados [1]. O SDF tem como objetivo reduzir o tempo necessário para o restabelecimento do sistema quando este apresentar faltas.

A metodologia apresentada neste trabalho é baseada em [4] e é estendida neste trabalho para obter resultados mais precisos e gerar um modelo mais representativo da SE.

Este artigo está organizado da seguinte maneira. Na seção 2, são apresentados alguns conceitos básicos sobre RP. A seção 3 apresenta um exemplo que ilustra a aplicação da metodologia. Na seção 4 é apresentada a topologia da subestação seguido de dois casos de ocorrências. Finalmente, na seção 5 são apresentadas as conclusões.

II. REDES DE PETRI

As RP são uma ferramenta matemática e gráfica para modelagem, análise e simulação de uma grande variedade de sistemas, em especial sistemas a eventos discretos. Uma RP possui dois tipos de nós chamados lugares e transições, os quais são conectados através de arcos direcionados. Os lugares são representados graficamente por círculos e as transições por barras ou retângulos. Um arco possui um número inteiro associado chamado de peso do arco. Fichas são atribuídas aos lugares e são representadas graficamente por um ponto. Um lugar com k fichas significa que k dados ou recursos estão disponíveis naquele lugar. Na Figura 1 é mostrada a representação gráfica de uma RP. Uma ficha no lugar P1 e nenhuma em P2 representa a marcação inicial da rede mostrada na Figura 1.

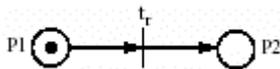


FIGURA 1 - Rede de Petri

Em uma RP, a ocorrência de um evento é representado pelo disparo de uma transição associada a este evento. Os lugares de entrada e saída da transição representam as pré-condições e as pós-condições do evento.

Na rede da Figura 1 os arcos possuem peso unitário. O peso de um arco determina a quantidade de fichas que serão retiradas e adicionadas respectivamente aos lugares de entrada e saída da transição, quando do seu disparo. Uma transição está habilitada a disparar quando a quantidade de fichas em seus lugares de entrada for igual ou superior ao peso do arco que liga cada lugar a esta transição. Quando a transição t_r é disparada uma ficha é retirada de P1 e é alocada uma ficha em P2, resultando na marcação final da RP. Neste estado t_r não poderá ser disparada novamente, pois não está habilitada devido a ausência de fichas em P1. A marcação final também pode ser obtida por manipulação matricial que relacione a marcação inicial e uma matriz que represente a topologia da rede [4]. Esta matriz é conhecida como matriz de incidência. A Equação 1 é a expressão básica de uma RP

$$M_f = M_0 + C \cdot U \quad (1)$$

em que:

- M_f representa a marcação a ser alcançada;
- M_0 representa a marcação atual, neste caso, a marcação inicial;
- C é a matriz de incidência;
- U é o vetor característico, ou vetor de transições disparadas;

Para a rede da Figura 1 temos $M_0 = [1 \ 0]^T$, $C = [1 \ 1]$

e

$U = 1$. Resolvendo a Equação 1 a marcação final será $M_f = [0 \ 1]^T$, em que T representa o vetor transposto.

III. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

A abordagem apresentada neste trabalho utiliza dois modelos RP: RP direta e RP reversa. A RP direta modela o comportamento dos disjuntores da SE recebendo como dados de entrada as informações sobre os relés da SE. Considerando como exemplo o sistema elétrico mostrado na Figura 2. O exemplo consiste de um alimentador genérico L1 que é protegido pelos relés R_1 e R_{1b} e seus respectivos disjuntores, CB_1 e CB_{1b} . A Figura 3 mostra a RP direta para o alimentador L1 da Figura 2. Também estão representados os relés principal R1 e de retaguarda R_{1b} do alimentador. Os disjuntores principal e de retaguarda são representados pelos lugares CB_1 e CB_{1b} , respectivamente.

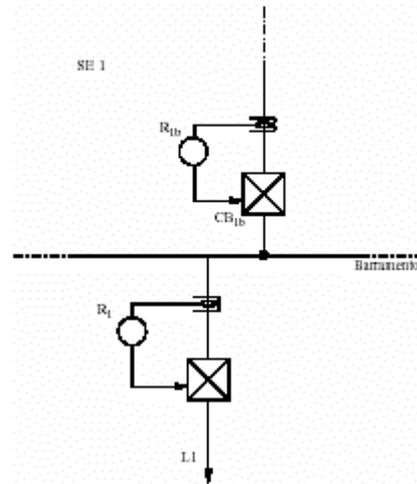


FIGURA 2 - Alimentador de uma subestação

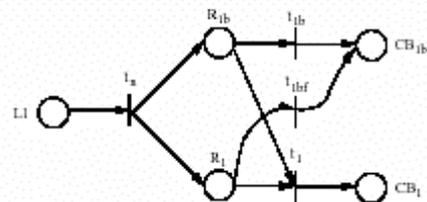


FIGURA 3 - Modelo rede de Petri direta

Invertendo o sentido dos arcos da rede direta e removendo aqueles relacionados às proteções de retaguarda, tem-se a RP reversa que modela o funcionamento dos relés do exemplo [4].

A RP reversa é ilustrada através da Figura 4. Esta rede modela o funcionamento dos relés presentes na SE, fornecendo o diagnóstico para estes dispositivos.

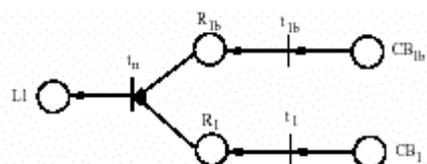


FIGURA 4 - Modelo rede de Petri reversa

O vetor característico da RP reversa é preenchido com valores unitários nas posições relativas aos relés que enviaram o sinal para que seu disjuntor associado elimine a falta. Já o vetor característico da rede direta receberá valor unitário nas posições referentes aos relés que atuaram e nas posições relativas a falhas de disjuntores.

As informações recebidas do SCADA são os dados que alimentam as RP direta e reversa, ou seja, suas marcações iniciais.

Cada uma das redes possui marcação inicial distinta. A rede reversa recebe o status dos disjuntores como marcação inicial e retorna uma classificação da atuação de cada um dos relés presentes na SE. Na lógica dos sinais de entrada os valores 1 e 0 representam atuação e não atuação, respectivamente. A marcação final da rede reversa fornece valores 0 ou -1 para cada um dos dispositivos da subestação. A combinação destes valores, apresentada na Tabela 2, indicará o diagnóstico para os relés. A atuação de um relé corresponde ao preenchimento de sua respectiva posição no vetor de controle da rede reversa.

Por exemplo, se um dispositivo de proteção possui um sinal de entrada 1 e o resultado da simulação mostra um valor -1, isto indica que o dispositivo operou indevidamente.

Para a análise dos disjuntores da SE é utilizada a rede direta.

A tabela 1 ilustra os possíveis resultados da análise juntamente com os sinais de entrada relacionados aos disjuntores. A análise do comportamento dos relés é feita de modo semelhante de acordo com a tabela 2.

TABELA 1
Comparação de dados para disjuntores

Rede Direta	Entrada	Interpretação
1	1	Operou corretamente
1	0	Falhou na operação
0	1	Operou indevidamente

TABELA 2
Comparação de dados para relés

Rede Direta	Entrada	Interpretação
1	1	Operou corretamente
1	0	Falhou na operação
0	1	Operou indevidamente
0	0	Não operou

A abordagem apresentada neste trabalho agrega as seguintes funcionalidades ao trabalho original de Lo et al[4]:

1. Análise mais precisa de falhas de relés associadas a funções *watchdog* do próprio dispositivo.

Em [4] o mesmo vetor característico é utilizado para as duas redes. A inicialização é feita da mesma forma que o vetor característico da rede reversa descrita acima. Ao

utilizar um mesmo vetor de controle para as redes direta e reversa, ignora-se a possibilidade de falhas do relé detectadas pela função *watchdog*. Se neste momento ocorrer falta na SE a falha deste relé seria interpretada como “não operou”, levando o disjuntor associado a ser diagnosticado como “operou indevidamente”. Para evitar esta inconveniência, os vetores de controle das duas redes foram diferenciados. Para a rede direta é levado em consideração a atuação e falha dos relés, além da falha dos disjuntores. Já para a rede reversa apenas as informações de atuação dos relés são computadas ao vetor característico.

2. O funcionamento da função *breaker failure* presente nos relés numéricos atuais.

No instante em que ocorre um curto circuito, o relé que é sensibilizado pela corrente de falta envia um sinal de *trip* que leva a abrir o disjuntor associado para a eliminação do defeito. Entretanto, este disjuntor pode falhar em realizar esta operação. Depois de aguardar um período de tempo e verificar que a abertura esperada não aconteceu, um novo sinal de *trip* é enviado ao disjuntor de retaguarda que deve eliminar o curto-circuito. Cada disjuntor da subestação possui uma transição que é disparada quando a função *breaker failure* entrar em operação.

3. Ajustes para permitir diferentes configurações da subestação.

Devido a questões operacionais, aumento de confiabilidade, defeitos ou ainda manutenção, a subestação pode assumir diferentes configurações durante seu funcionamento. O SDF proposto permite a adequação do modelo às diferentes configurações que a subestação pode assumir. Em SE com arranjo de barramento principal e de transferência, os dois ou apenas um pode estar energizado. Dependendo de que barramentos estão em operação, diferentes disjuntores estarão aptos a operar no momento em que defeitos se apresentarem. Para o monitoramento de SE com este tipo de configuração foram acrescentadas transições que representam as chaves que realizam as operações de transferência entre os barramentos.

3.1 Exemplo Ilustrativo

Para ilustrar a metodologia brevemente apresentada, utilizaremos novamente o exemplo da Figura 2. Os disjuntores são representados pelos lugares CB_1 e CB_{1b} , fichas nestes lugares indicam a abertura destes dispositivos. Uma ficha no lugar L1 indica uma anormalidade no funcionamento do alimentador. O disparo de t_n está relacionado ao fato de qualquer um dos relés estar apto a entrar em operação. As posições relativas a t_1 e t_{1b} no vetor carac

terístico recebem valor 1 em caso de atuação dos respectivos relés. Supondo que R1 detectou um defeito, R1 envia *trip* para o disjuntor CB_j . Com isso são disparadas as transições t_n e t_j resultando na colocação de uma ficha no lugar CB_j indicando que este dispositivo deveria ter aberto seus contatos para eliminar a falta. Se a abertura do disjuntor for confirmada pelo SCADA o dispositivo recebe sinal de entrada com valor 1. Desta maneira fica caracterizada uma operação correta do dispositivo, segundo a Tabela 1.

IV. ESTUDO DE CASO - SUBESTAÇÃO DE BEBERIBE

Nesta seção serão analisadas duas ocorrências que aconteceram na SE de Beberibe. A primeira analisa o caso em que um defeito num dos alimentadores provoca a deserregização de toda a SE. A outra ocorrência mostra a utilidade da ferramenta para casos da atuação da função breaker failure. A análise das ocorrências é precedida por uma descrição da SE.

A. Descrição da Subestação

A SE Beberibe é parte do sistema elétrico da Companhia Energética do Ceará (COELCE). Está localizada na

cidade de Beberibe, Nordeste do Brasil, e é designada por SE Beberibe, ou simplesmente SE BBR. A SE BBR é uma subestação distribuidora com potência instalada de 15MVA, a qual possui um vão de entrada de linha em 69kV que pode ser conectado a um barramento principal ou de transferência, como pode ser visto na Figura 5. O disjuntor designado para a função de transferência de barramentos pode também substituir o disjuntor principal da entrada de linha sendo comandado pelo mesmo relé associado ao disjuntor principal.

O vão de transformação é o mais complexo e é composto de um transformador 69/13,8kV protegido no lado de média tensão por um disjuntor principal ou por um disjuntor de transferência dependendo do barramento a que o transformador esteja conectado. Ligado aos barramentos em média tensão existe um vão de regulação e três vãos de alimentadores. O barramento de transferência é protegido por um relé associado ao disjuntor de transferência. Este relé possui dois grupos de ajustes.

O primeiro grupo de ajuste é habilitado quando o disjuntor de transferência está substituindo o disjuntor geral do barramento de média tensão e o segundo grupo de ajuste é habilitado quando o disjuntor de transferência estiver substituindo um dos religadores. Cada alimentador é protegido por um relé com funções de religamento.

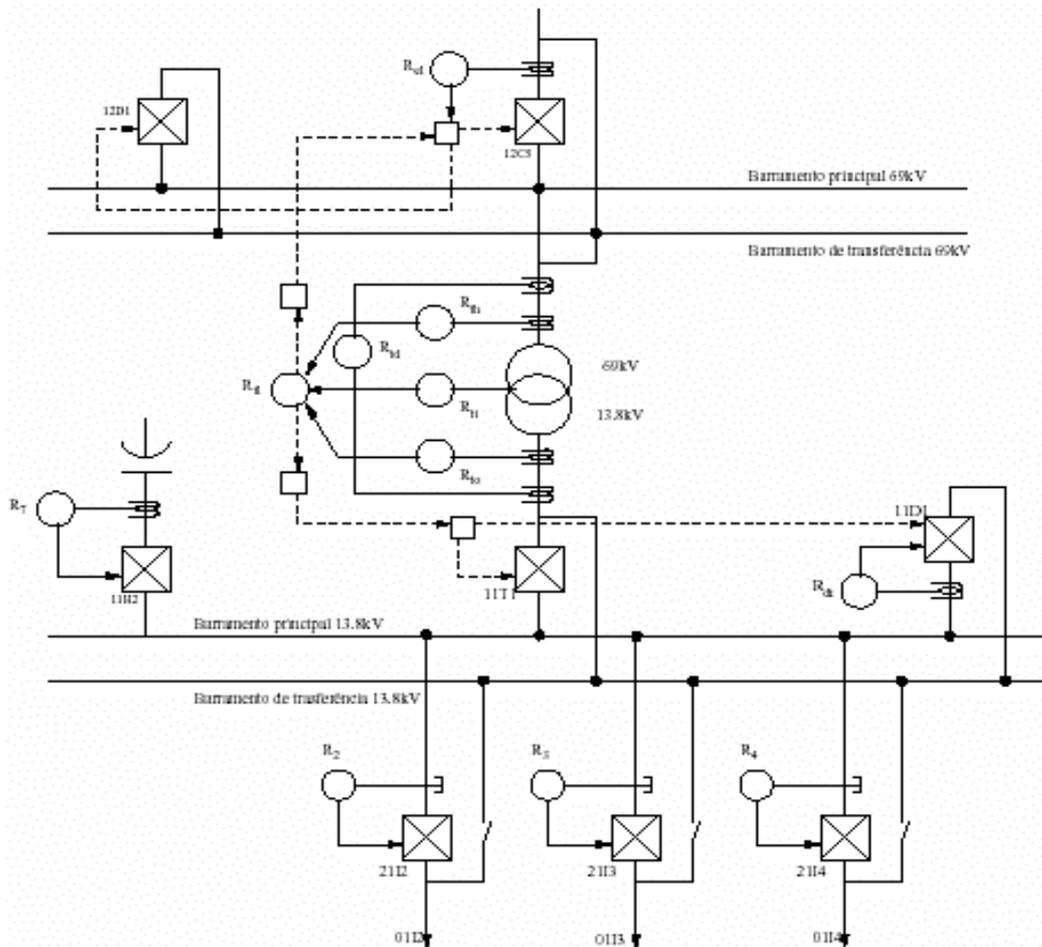


FIGURA 5 - Diagrama unifilar da SE Beberibe

B. Caso 1 - Desenergização da Subestação

A falta consiste em um curto-circuito no alimentador 01I2 da SE BBR, seguido da desenergização da SE com a abertura do disjuntor 12C5. Abaixo temos a seqüência dos eventos ocorridos durante a falta:

- Corrente de falta no alimentador 01I2;
- Relé R_2 é sensibilizado;
- R_2 envia *trip* para 21I2;
- 21I2 falha em abrir seus contatos e a falta não é eliminada;
- R_{el} é sensibilizado e envia *trip* para o disjuntor de entrada de linha 12C5;
- 12C5 abre e a falta é eliminada

Neste momento o operador da SE encontra-se com uma quantidade de eventos relativamente grande para ser analisada antes que qualquer medida seja tomada. Uma verificação de quais eventos ocorreram é realizada para tomar conhecimento dos reais fatos, pois a simples visualização dos alarmes não descreve fielmente os acontecimentos como na lista acima. Depois de conhecidos os eventos da ocorrência, pode ser feito um questionamento sobre o disjuntor 11T1 que em nenhum momento participou da ocorrência e nem R_{ib} foi sensibilizado.

Todo este procedimento acima deve ser executado pelo operador da SE. A presença do sistema de diagnóstico proposto ofereceria as seguintes vantagens:

- Resumo dos eventos da ocorrência. Imediatamente após a falta seria apresentado um resumo dos eventos ocorridos durante a falta, dispensando o operador da tarefa de buscar no SCADA os eventos que ocorreram. Isto é obtido através de um filtro de eventos que mostra ao operador apenas os eventos relevantes para análise desta ocorrência, enquanto que o SCADA possui um universo de informações que dificultam o trabalho do operador neste momento.
- Apresenta possíveis causas e a localização da falta. Descoordenação da proteção, falha de dispositivos, falhas na alimentação do dispositivo, falhas de comunicação podem ter ocasionado a falta e são apresentadas imediatamente ao operador
- Maior segurança na reenergização da SE

C. Caso 2 - Atuação da função breaker failure

O segundo caso analisado consiste em curto-circuito no alimentador 01I3 seguido de abertura do disjuntor 11T1 pela função breaker failure. Abaixo segue a seqüência detalhada dos eventos.

- Relé R_3 é sensibilizado pela corrente de falta e envia *trip* para 21I3;
- Disjuntor 21I3 falha em abrir seus contatos;
- A função *breaker failure* de R_3 é acionada enviando *trip* para o disjuntor de retaguarda, 11T1;
- 11T1 abre seus contatos eliminando a falta.

Apesar de o disjuntor de entrada de linha (12C5) não ter sido envolvido, a abertura de 11T1 torna as consequências desta ocorrência tão graves quanto a primeira ocorrência analisada.

Toda a carga da SE foi desligada, pois a abertura do disjuntor 11T1 desenergiza o barramento a que os alimentadores estão conectados.

O mesmo processo de tomada de conhecimento dos eventos deve ser realizado pelo operador para se acercar de informações que expliquem a ocorrência da falta e direcione suas ações.

O que demanda um tempo considerável com o sistema fora de operação. O sistema de diagnóstico proposto evita este longo período de parada. Diante do resumo dos eventos que é apresentado ao operador, é fácil verificar os eventos que aconteceram durante a ocorrência. Assim, pode-se verificar por qual relé a abertura de 11T1 foi comandada. Sem o SDF o operador teria que buscar pesquisar manualmente na base de dados da SCADA para tentar restabelecimento do sistema. Além disso, também seria necessário verificar se o relé de algum alimentador foi sensibilizado. No caso desta ocorrência o relé R_3 foi sensibilizado dispensando o operador das verificações descritas acima. Logo a simples apresentação do resumo dos eventos já possibilitaria ao operador o restabelecimento do sistema excluindo-se o alimentador defeituoso, 01I3.

No estágio atual de desenvolvimento, o SDF funciona em modo off-line. Para teste e validação do SDF, a equipe desenvolveu um. Na Figura 6 é apresentado o emulador de eventos do sistema SCADA (EmulaSCADA)

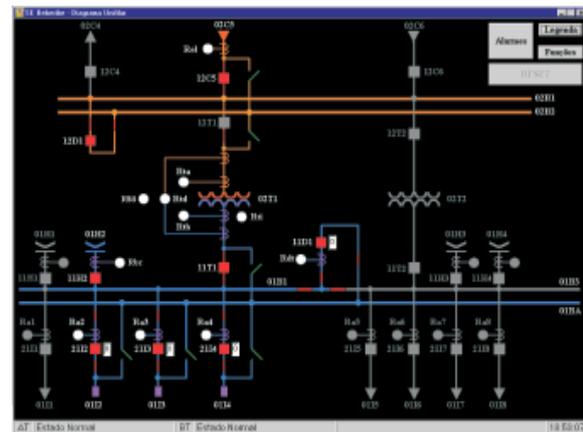


FIGURA 6 – Emulador de eventos do sistema SCADA

V. CONCLUSÕES

Neste artigo é feita uma breve introdução à metodologia utilizada para a implementação do Sistema de Diagnóstico de Falta e é apresentado o emulador de eventos do sistema SCADA (EmulaSCADA) desenvolvido. Os casos apresentados são reais e os resultados atenderam às expectativas sugerindo uma implementação em tempo real deste sistema, dado que os testes com o EmulaSCADA foram satisfatórios.

Esta ferramenta computacional vai proporcionar à empresa e aos profissionais de operação do sistema elétrico de potência os seguintes benefícios: tornar a tarefa de diagnóstico de falta menos estressante e complexa para os operadores; informar as causas de ocorrências no sistema de forma mais rápida e precisa; proporcionar maior segurança na operação do sistema; reduzir o custo operacional de análise de ocorrências; contribuir na melhoria dos índices de confiabilidade do sistema e oferecer aos consumidores um melhor atendimento, consequentemente aumentar a satisfação dos clientes.

Em subestações de maior porte os benefícios do SDF são ainda mais evidentes em virtude da dificuldade na análise das ocorrências estar diretamente relacionada ao tamanho e complexidade da subestação.

A utilização do SDF em subestações e centros de controle pode trazer maior agilidade no restabelecimento do sistema em situações de emergência ou quando ocorrerem múltiplas faltas no sistema. Este modelo é adequado a tarefa de diagnóstico em tempo real permitindo a exibição imediata do relatório de diagnóstico ao operador, uma vez que as RP trazem um modelamento simples e de baixo esforço computacional.

Este projeto tem sido divulgado através de eventos nacionais e internacionais do setor elétrico, tendo boa receptividade do público face à necessidade real da área de operação das empresas de uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão durante condições de ocorrências no sistema. Como resultado do projeto teve-se o desenvolvimento de um SDF para subestação, o desenvolvimento do

emulador de evento de sistema SCADA, publicação de uma dissertação de mestrado concluída e três outras dissertações em andamento.

Como trabalho futuro vislumbra-se: o desenvolvimento de uma interface para integração do SDF ao sistema SCADA da SE Beberibe para diagnóstico de falta em tempo real; o desenvolvimento de um SDF para o Centro de Operação do Sistema para análise de faltas entre subestações interligadas; e a modelagem e implementação de um sistema automático de reposição do sistema elétrico de potência a partir do diagnóstico de falta. Além disso, busca-se também adaptar e flexibilizar a ferramenta EmulaSCADA para compor qualquer configuração de subestação e evoluí-la para uma ferramenta aplicada a treinamento de proteção de sistemas elétricos.

REFERÊNCIAS

- [1] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5460: Sistema Elétrico de Potência - Terminologia, 1992.
- [2] LEFORT H. Evolução de um sistema de comando e controle clássico para um sistema numérico de comando, controle e proteção. In V STPC - Seminário Técnico de Proteção e Controle, pages 15_20, 1995.
- [3] JARDINI José Antônio, MAGRINI Luís Carlos, KAYANO Paula S. D. Automação de subestações e de sistemas de distribuição industriais. In Revista Eletricidade Moderna, pages 36-50, Nov/1996.
- [4] K.L. Lo, H.S. Ng, D.M. Grant, and J. Trecat. Extended petri net models for fault diagnosis for substation automation. In IEEE Proceedings, volume 146, pages 229-234, 1999.
- [5] R.P.S. Leão R.F. Sampaio, G.C. Barroso. System of fault diagnosis for electric power system based on colored petrinets. In I Brazilian Meeting on Petri Nets, pages 1-6, 2002.
- [6] R.F. Sampaio. Sistema de diagnóstico de faltas para subestações baseado em redes de petri coloridas. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, 2002.
- [7] Men-Shen Tsai Wen-Hui Chen, Chih-Wen Liu. On-line fault diagnosis of distribution substations using hybrid causeeffect network and fuzzy rule-based method. In IEEE Transactions on Power Delivery, volume 15, pages 710-717, 2000.