

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Engenharia Elétrica

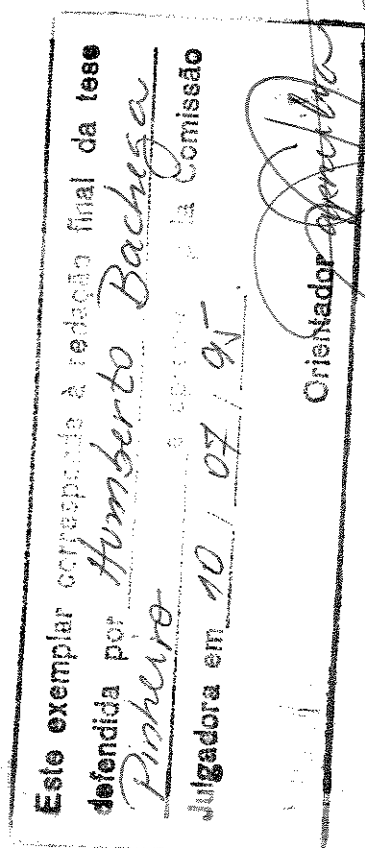
Julho de 1995

Sistema Especialista para Operação de
Subestações de Energia Elétrica

Humberto Bachea Pinheiro

Orientador : Marcos Carneiro da Silva
Co-orientador : Paulo Morelato França

Tese de Mestrado apresentada à Faculdade de
Engenharia Elétrica da Universidade Estadual
de Campinas.



Agradecimentos

Aos orientadores Marcos e França, pela amizade e pela dedicação .

Aos amigos e colegas que me apoiaram e me ajudaram tanto no desenvolvimento do projeto SE2, como na elaboração deste texto: Angélica, Paulão, Rona, Luís F., José Luís e Hermano.

Ao sr. Nicolau por ter compartilhado seus preciosos conhecimentos.

Aos gerentes do AI, Tozzi, Ione, Chico e Fábio, que possibilitaram a realização desse trabalho.

Aos meus pais, José Coelho e Glória, ao Gurty e Ká, ao Zim e à Tavinha pela nossa convivência.

À minha esposa Márcia pelo carinho, apoio e naturalmente, paciência.

RESUMO

Este trabalho apresenta um Sistema Especialista para operação de subestações de energia elétrica. No seu desenvolvimento uniu-se técnicas de Inteligência Artificial a técnicas de Otimização. O Sistema Especialista funciona como um monitor. Ele supervisiona todas as ações sobre a subestação, permitindo ou não certas manobras e sugerindo planos de manobras para isolamento de equipamentos para reparo, reenergização (restauração) e colocação de equipamentos em manutenção. Atenção especial foi dada ao problema de reenergização, modelado como um problema do tipo Caminho Mínimo e tratado com um método iterativo baseado no algoritmo de *Dijkstra*. Esse método também foi utilizado na determinação da estratégia de colocação de equipamentos em manutenção, onde há a preocupação de não causar interrupção no fornecimento de energia aos alimentadores. Um protótipo, batizado de SE2, foi desenvolvido em linguagem C++, baseado em plataforma PC. Está prevista sua utilização pela Cia. Paulista de Força e Luz - CPFL, em aplicações como o Estudo de Confiabilidade de Subestações, treinamento de operadores e no auxílio à tomada de decisão em relação a operação de subestações.

ABSTRACT

This thesis presents an expert system for electric power substation operation. For the development of this system, Artificial Intelligence techniques and Optimization techniques were both used. This system supervises every action within the substation, allowing or not certain operations and suggesting plans for equipment isolation and restoration.

Special attention was given to the restoration problem, modeled as a Shortest Path type problem and treated with an iterative method based on Dijkstra Algorithm. This method was also used in the determination of a strategy for setting apart equipment for maintenance, where the major concern is not to cause interruption to the feeders.

A prototype, given the name SE2, was developed in C++ based on the PC platform. The utilization of this system by the *Cia. Paulista de Força e Luz - CPFL* is foreseen in applications such as substation reliability study, operator training, and as an aid in decision-making related to the substation operation.

Conteúdo

1- Introdução	1
2- O Problema de Operação de Subestações	5
Considerações Iniciais	5
O Problema	8
Evolução	10
3- Abordagem Proposta	13
3.1 - Modelo de Dados	13
Definições	13
O Modelo	14
Formação da Floresta a Partir do Grafo Conexo Inicial.	20
Tratamento de Ciclos: Nós Artificiais e Falsos Arcos	21
Acoplamento com a Interface Gráfica.	24
3.2 - O Sistema Especialista	26
Considerações Iniciais	26
Representação do Conhecimento Baseada em Regras	27
Conhecimento sobre o Conhecimento: Metaknowledge	29
Descrição do Sistema Especialista:	30
A Máquina de Inferência	31
Lista de Eventos:	34
3.3 - Reenergização	36
Representação do Conhecimento sobre o Problema de Reenergização de Emergência	42
A Distribuição dos Custos nos Arcos	43
Primeiros Resultados	50
3.4 - Manutenção	61
Multicoloração	63
4- Resultados	69
1º Exemplo:	70
2º Exemplo:	73
O Exemplo de Tanquinho.	74
5- Conclusões	80

Apêndice 1	83
Arranjo SUB1: Barra Simples	83
Arranjo SUB2: Barra Dupla	84
Arranjo Tanquinho 1	85
Arranjo Tanquinho 2	86
Arranjo Tanquinho 3	87
 Bibliografia	 88

1- Introdução

A idéia de que algum dia o computador alcançasse ou até mesmo superasse as habilidades e capacidades intelectuais humanas em alguns casos onde o homem parece ser insuperável, tem sido levantada desde sua invenção. No final da década de 50, uma disciplina chamada *Inteligência Artificial* veio então para iniciar a tarefa de definir o conceito de "inteligência".

O termo *Inteligência Artificial*, foi pela primeira vez utilizado por John McCarthy em um encontro no Dartmouth College em 1956. Nesse encontro, pioneiros como Marvin Minsky, Allen Newell, Herbert A. Simon, entre outros, discutiram os primeiros conceitos dessa disciplina.

No início, pesquisadores escreveram programas para resolver quebra-cabeças, provar teoremas, jogar xadrez, com o objetivo de estabelecer teoricamente os limites da "inteligência do computador". Nos dias de hoje, têm havido sucessos significativos no campo da Inteligência Artificial, principalmente no desenvolvimento de softwares conhecidos como *Sistemas Especialistas* [Kin] [Wat] [Rot] ou *Sistemas Baseado em Conhecimento*. Avanços em tecnologias de Sistemas Especialistas têm sido alcançados por pesquisadores em universidades, centros de pesquisa e empresas interessadas no desenvolvimento de sistemas de Inteligência Artificial, auxiliados pelo contínuo e acelerado avanço tecnológico dos computadores, que a cada ano se tornam mais poderosos em termos de velocidade, capacidade de processamento e armazenamento de dados, e ao mesmo tempo, cada vez menores, mais baratos, e sem exigir infra-estruturas especiais para operarem, aliados ainda, a softwares que propiciam melhores ambientes computacionais para o desenvolvimento e execução desses sistemas.

Sistemas Especialistas são classificados como um ramo da Inteligência Artificial. O primeiro Sistema Especialista foi desenvolvido por Feigenbaum na Universidade de Stanford, na década de 70, e foi batizado de

"DENDRAL" [Fei]. Esse sistema interpretava dados de espectroscopia para determinar a estrutura molecular de componentes desconhecidos.

Os Sistemas Especialistas tornaram-se bastante populares, em virtude de sua especialização voltada para uma determinada e restrita área de conhecimento . Áreas como medicina, química, geologia, eletrônica, agricultura, entre outras, tiveram benefícios significativos com sua utilização. Além disso, o pequeno tamanho de cada aplicação, relativa aos recursos disponíveis, tornou possível a codificação do conhecimento e seu armazenamento em computadores pequenos e baratos.

Em sistemas elétricos , pode-se notar também importantes contribuições com o desenvolvimento e aplicação de Sistemas Especialistas. Embora as primeiras publicações nesse campo tenham aparecido somente a partir de 1982, as pesquisas começaram bem antes. O acidente com a usina nuclear de THREE MILE ISLAND, incentivou a utilização da tecnologia de Sistemas Especialistas nos sistemas de geração de energia elétrica. Foi desenvolvido o NPPC (Nuclear Power Plant Consultant), para auxiliar operadores a determinar causas de eventos anormais, tendo seu protótipo ficado pronto em 1982.

Um dos primeiros e importantes trabalhos sobre aplicação de sistemas Especialistas em energia elétrica, foi publicado em 1983 por *Sakaguchi e Matsumoto* [Sak] onde era proposto um Sistema Especialista para restaurar o suprimento de energia (interrompido devido a um evento qualquer) sem causar sobrecarga nas linhas de transmissão. A partir de então, um grande número de artigos foi publicado sobre o assunto. Em Processamento de Alarmes, podem ser citados vários trabalhos [Ara] [Bij] [Kir] [Tes] [Pro], sendo que um dos primeiros foi apresentado por *Wollenberg* em 1986, que propunha um Sistema Especialista de *Tempo Real* [Wol] para analisar continuamente as condições de um sistema elétrico, extraindo informações de um conjunto de mensagens de alarme e apresentando ao operador informações concisas sobre seu estado. Outro campo onde há um grande número de trabalhos desenvolvidos é o de Diagnóstico de Falhas em Sistemas Elétricos

[Hsu] [Kam] [Kan] [Kim] [Lin] [Tal1] [Tal2] [Pro]. Em [Tal1] especificamente, é descrito um Sistema Especialista para diagnóstico de falhas na rede elétrica, com enfoque para o conceito de **DPS** (Distributed Problem Solving). Em Operação e Controle de Sistemas Elétricos, *Liu e Tomsovic* apresentaram um Sistema Especialista [Liu1] para auxiliar operadores no controle de potência reativa. Nessa última área, outros trabalhos [Kum] [Tom] merecem ser mencionados.

Sem querer ser exaustivo, várias outras contribuições podem ser citadas, em áreas como Restauração [Cav] [Del] [Koj1] [Koj2] [Liu2] [Mat] e Projetos de Sistemas Elétricos [Bro] [Coh] [Put].

A operação de sistemas elétricos tem se tornado cada vez mais complexa devido, principalmente, às suas atuais dimensões, agravado pelo fato desses sistemas estarem interligados entre si, e também devido às constantes cobranças por parte da sociedade, em relação à qualidade dos serviços prestados pelas empresas concessionárias responsáveis pela geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. As subestações de energia elétrica, que são o objeto desse trabalho, são elos de grande importância dentro desses sistemas e aliado ao fato de haver um grande número de equipamentos e chaves nos seus arranjos, tornam sua operação delicada, requerendo dos operadores bastante cuidado e muita experiência.

Nesse contexto, um sistema especialista pode auxiliá-los nessa tarefa, impedindo a ocorrência de erros, e até mesmo, sugerindo manobras mais seguras. Além disso um sistema especialista para operação de subestações de energia elétrica seria importante para preservar a valorosa experiência dos operadores, experiência essa que não se encontra em livros ou manuais.

Propõe-se neste trabalho, um Sistema Especialista para operação de subestações de energia elétrica. Com ele pretende-se, entre outras coisas, disponibilizar aos operadores e aos centros de operação, uma ferramenta de apoio à tomada de decisão para as manobras realizadas em subestações, principalmente manobras de isolamento de equipamentos para reparo ou manutenção e manobras para reenergização de emergência. Conjuntamente, foi

desenvolvida uma interface homem-máquina, com recursos de computação gráfica, que reproduz o unifilar das subestações a serem manobradas, apresentando de forma clara todas as ações tomadas pelo Sistema Especialista.

A Cia. Paulista de Força e Luz - CPFL tem especial interesse neste Sistema Especialista pois pretende, num primeiro momento, utilizá-lo no estudo de confiabilidade de suas subestações, podendo também aproveitá-lo para treinamento de operadores. Futuramente, pretende-se integrá-lo a outras ferramentas computacionais de operação de sistemas elétricos

No capítulo 2, serão apresentadas as motivações que propiciaram a realização desse trabalho e a construção do protótipo do Sistema Especialista, batizado de SE2.

No capítulo 3, serão discutidos os modelos de dados para a representação simbólica dos arranjos das subestações, as técnicas empregadas no desenvolvimento do Sistema Especialista e a representação do conhecimento para os problemas de reenergização de emergência e de colocação de equipamentos em manutenção.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos com a aplicação do SE2, em alguns arranjos de subestações de distribuição e de transmissão. No caso das de distribuição, trata-se da grande maioria das subestações da CPFL. No capítulo 5, tem-se as conclusões.

2- O Problema de Operação de Subestações

Considerações Iniciais

As subestações são entidades dentro do sistema elétrico, responsáveis pela elevação ou abaixamento do nível de tensão. Em geral, as subestações elevadoras se situam próximas dos pontos de geração e elevam o nível de tensão para diminuir as perdas nas linhas de transmissão. As abaixadoras fazem o contrário, transformando o nível de tensão de transmissão em valores apropriados para a subtransmissão ou para a distribuição. Existem subestações que fazem a interligação entre linhas de transmissão, sem no entanto, alterar o nível de tensão.

Vários equipamentos compõem uma subestação e dentre eles podem ser citados os Transformadores, que são os responsáveis pela alteração do nível de tensão; os TC's (transformadores de corrente), responsáveis pela medição da corrente elétrica dentro de uma subestação; os TP's (transformadores de potencial), que medem a tensão; os Disjuntores e Religadores, cuja função principal é a proteção contra correntes de curto-circuito (abrem automaticamente nesses casos). As subestações também possuem uma quantidade variada de chaves, além de linhas e barramentos, que realizam as ligações entre os seus vários equipamentos. Na figura PB1, a seguir, é mostrada uma subestação e seus componentes.

Uma única falha em algum componente de uma subestação pode comprometer seriamente o fornecimento normal de energia elétrica, causando prejuízos tanto aos consumidores como à empresa concessionária. Em

particular, dentro dos sistemas de distribuição, essa importância fica mais aparente devido à forma radial de operação e à proximidade com o consumidor.

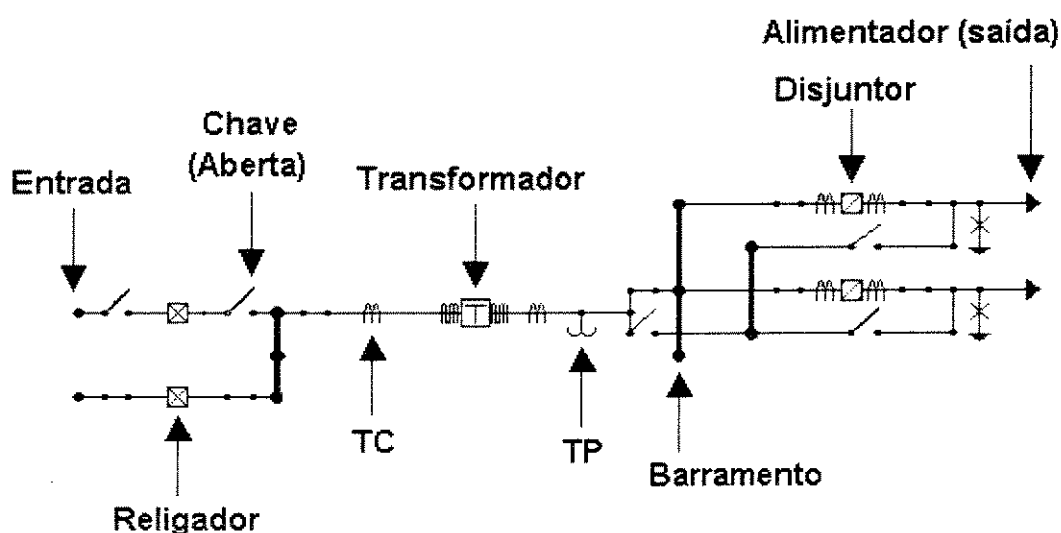


figura PB1

As subestações estão sujeitas a muitos contratempos, tais como falhas nos mecanismos automáticos, falhas nos sistemas de proteção e mesmo falha nos equipamentos. Essas falhas podem causar interrupção de energia aos alimentadores e às linhas de transmissão, tornando necessário operações para a reenergização. Essas operações são freqüentes também em caso de necessidade de se colocar equipamentos em manutenção, realocação de carga, e outros tipos de manobras.

Erros nas operações são bastante sérios, e suas conseqüências podem ser muito graves, para o operador e para o sistema. As manobras são normalmente regidas por regras e normas que visam cumprir um determinado objetivo (por exemplo: reenergizar um alimentador). Todavia, essas regras e normas não impedem que, em momentos críticos ou de grande "stress" para o operador, ele cometa uma manobra ilegal e muitas vezes perigosa. Além disso,

existem outros fatores que podem comprometer a correta aplicação dessas regras, como a falta de experiência e/ou de treinamento dos operadores.

Os projetos de subestações contemplam o aspecto de segurança contra falhas em equipamentos, tentando minimizar suas conseqüências. Segurança aqui nesse contexto, significa não somente instalação de equipamentos de proteção como disjuntores e religadores, que atuam justamente para evitar que equipamentos sejam danificados, mas também a preocupação em projetar arranjos que contenham caminhos alternativos de reenergização, evitando que a desconexão de alguns ramos da subestação (isolados para reparo, por exemplo) possa interromper definitivamente o fluxo de energia aos alimentadores ou linhas de transmissão.

Quanto maior essa segurança maior o custo da subestação, uma vez que engloba a necessidade de instalação de um número maior de equipamentos como disjuntores e religadores, e a construção de arranjos mais complexos. Isso implica que em uma subestação, quanto maior for sua segurança contra falhas menor será a quantidade de *energia não suprida* em um determinado período de tempo, o que aumenta sua *confiabilidade*. Daí a importância do *estudo de confiabilidade*, para que se possa obter parâmetros para levantar o custo/benefício de, por exemplo, um novo arranjo para uma determinada subestação. Busca-se saber se o gasto com mais equipamentos de proteção irá ser compensado ou superado pela diminuição da quantidade de energia não suprida, ao longo de um horizonte pré-determinado. Isso significa, em última instância, o aumento de faturamento para a empresa concessionária e melhor qualidade de serviço.

Confiabilidade [Cam] de uma subestação é entendida como o grau de segurança com que ela supre energia aos pontos principais de distribuição. O objetivo do Estudo de Confiabilidade é a elaboração de projetos que permitam

às subestações operarem, mesmo quando alguns de seus componentes estão defeituosos.

Para esse estudo é necessário:

- ☐ Estabelecer um modelo matemático e/ou simbólico para o problema.
- ☐ Obter dados sobre os componentes tais como taxa de falhas, tempo de reparo, taxa de manutenção e outros.
- ☐ Conhecimento de táticas de manobras que respeitem as condições operativas, as regras e as normas de operação e de segurança.

O Problema

As primeiras idéias a respeito desse trabalho surgiram quando a *Companhia Paulista de Força e Luz - CPFL* mostrou interesse no sentido de desenvolver uma ferramenta computacional, que fosse capaz de avaliar o índice de confiabilidade de suas subestações, sejam já existentes e com possibilidade de alteração ou ampliação de seus arranjos, sejam aquelas a serem instaladas. Essa ferramenta teria como objetivo auxiliar os projetistas a contemplar um conjunto grande de configurações, de forma que se pudesse obter aquela que fosse a melhor sob o ponto de vista de custo e confiabilidade. É importante ressaltar que não se trata de um configurador, mas sim de um sistema que permita, dado um arranjo qualquer, que se tenha meios de simular todas as situações possíveis de ocorrer em uma subestação real e obter, por conseguinte, informações relativas ao cálculo de confiabilidade.

Esse cálculo é feito simulando, para cada possível sequência de ocorrências (falhas ou manutenção), as operações necessárias para tentar garantir a continuidade de suprimento de energia aos alimentadores, computando as frequências e as respectivas durações dessas ocorrências.

Normalmente, para fazer o cálculo da energia não suprida é definido um fator de carga médio, uma vez que a demanda de uma subestação varia no decorrer do dia. Uma subestação de distribuição por exemplo, que opera em áreas predominantemente residenciais, tem seu pico de carga no período noturno, devido ao aumento de consumo decorrente da utilização de aparelhos domésticos como televisores, chuveiros, aquecedores e outros. Essa carga diminui substancialmente durante a madrugada, voltando a crescer durante o dia. Caso essa subestação alimentasse áreas predominantemente industriais, seu pico de carga poderia se dar durante o dia, quando as indústrias estão em plena produção, diminuindo consideravelmente no início da noite e assim permanecendo até o amanhecer, quando então o consumo de energia aumenta novamente.

Nesses cálculos são computados os tempos de restabelecimento de energia, perseguido através de manobras com chaves e disjuntores. Essas manobras obedecem a regras e normas que devem ser respeitadas para que a simulação seja válida. Muitas dessas regras fazem parte do conhecimento adquirido pelos operadores através de anos e anos de experiência e treinamento, e dessa forma, fica claro que para a implementação de um sistema com os objetivos descritos anteriormente, há a necessidade de adquirir e representar esse conhecimento.

Além disso, existe um problema combinatorial associado. Manobras para reenergização de emergência podem ser feitas de várias maneiras através de operações com chaves, disjuntores e religadores. Muitas delas são inviáveis sob o ponto de vista operativo, pois podem colocar em risco o operador e causar danos a equipamentos. É nesse problema que a atuação e o conhecimento dos operadores mostram-se ricos, uma vez que as atitudes a serem tomadas devem ser rápidas e seguras, necessitando além de muita experiência, uma boa dose de "bom senso".

Devido aos fatos expostos anteriormente, para a implementação de tal ferramenta computacional, foi necessário unir técnicas de inteligência artificial a técnicas de otimização, para o problema de representação do conhecimento em operação de subestações e para os problemas combinatoriais, respectivamente.

Para o conhecimento de táticas de manobra, foi necessária a preciosa ajuda de um *expert* em operação e proteção de subestações. Foi então desenvolvido um *Sistema Especialista* justamente para incorporar esse conhecimento à ferramenta computacional. Esse *Sistema Especialista* é capaz de controlar todas as ações sobre uma subestação, proibindo operações ilegais, sugerindo manobras ótimas sob o ponto de vista de segurança e tempo de operação, para isolamento de equipamentos e restabelecimento do fornecimento de energia em caso de interrupção, monitorando sempre a capacidade dos equipamentos da subestação. Tudo isso aliado a uma interface homem_máquina com recursos de computação gráfica.

O Sistema Especialista foi desenvolvido em linguagem C++ e foi batizado de "*SE2*".

Evolução

No decorrer do trabalho, notou-se que o "*SE2*" poderia ser aplicado a outras tarefas e não só ao estudo de confiabilidade. Uma dessas possíveis tarefas seria o treinamento de recursos humanos responsáveis pela operação de subestações. Uma outra, seria servir como ferramenta de apoio ao operador, auxiliando-o na tomada de decisão referente a manobras de isolamento de equipamentos para reparos ou manutenção e reenergização de alimentadores.

Finalmente, no futuro poderia juntamente com outros sistemas especialistas, contribuir para a automação das subestações. Um desses novos sistemas especialistas deve ser do tipo **SIPA** (*Sistema Inteligente de Processamento de Alarme*) e outro do tipo **SIDF** (*Sistema Inteligente de Diagnóstico de Falhas*). Eles são importantes dentro de um contexto de automação de subestação porque o "SE2" necessita de informações que devem ser passadas por entes externos a ele. No caso de uma falha por exemplo, ele deve ser informado em qual equipamento ela ocorreu. Quando ele é usado para treinamento, o próprio usuário gera essas informações, e no caso do estudo de confiabilidade, um módulo adicional se encarrega de gerá-las. Dessa forma, no advento de uma futura automação das subestações, um SIPA e um SIDF serão os responsáveis pela alimentação desse tipo de informação ao "SE2".

De acordo com trabalhos publicados [Wol] [Ara] [Bij] [Kir] [Tes] [Tal1] [Tal2] [Hsu] [Pro] [Kam] [Kan] [Kim] [Lin], esses dois sistemas especialistas (SIPA e SIDF), são responsáveis pela análise dos alarmes gerados por um sistema elétrico. Embora ambos tenham como objetivo gerar melhores informações para sistemas de monitorização, diferenciam-se principalmente no tipo de informação que produzem.

Um SIPA se preocupa em facilitar a visão geral sobre um estado atual de um sistema elétrico, reduzindo o número de alarmes a serem apresentados, descartando os redundantes e os que não apresentam informações importantes, e também substituindo vários alarmes por um único que resuma a condição apresentada por eles. Por sua vez, um SIDF se concentra em encontrar uma justificativa para um conjunto de ocorrências, analisando uma série de dados, entre eles, os alarmes gerados.

Assim, de uma forma geral, um SIPA tenta descrever o que está ocorrendo e um SIDF se preocupa em tentar explicar o porquê de estar

ocorrendo determinados eventos, analisando somente os alarmes necessários para encontrar a falha.

Devido à independência e flexibilidade do uso do "SE2" diante das possíveis aplicações, não será discutida com mais detalhes sua aplicação no Estudo de Confiabilidade que como dito anteriormente, foi a motivação inicial deste trabalho e o primeiro objetivo a se cumprir com o desenvolvimento do "SE2".

Nesse trabalho serão discutidas as técnicas utilizadas no desenvolvimento desse Sistema Especialista, apresentando como resultados os testes realizados em arranjos de algumas subestações da CPFL, abordando superficial e intuitivamente, o conceito de confiabilidade, sem no entanto, aprofundar nesse assunto.

3- Abordagem Proposta

3.1 - Modelo de Dados

Definições

Toda subestação é composta por elementos que se enquadram em duas categorias:

- ☐ **Estáticos** - são aqueles componentes que não têm influência na topologia da subestação, como por exemplo: transformadores, tc's, tp's, banco de capacitores, barramentos, linhas e outros. Entende-se por "linhas", cabos de ligação entre os equipamentos da subestação.
- ☐ **Dinâmicos** - influem diretamente na topologia da subestação, isto é podem ser manipulados a fim de mudar a topologia da rede. Como exemplo, temos as chaves, os disjuntores e os religadores.

Os componentes dinâmicos por sua vez, podem ser divididos em três grupos:

- ☐ Os que podem interromper corrente de carga e corrente de curto-circuito: Disjuntores e Religadores.
- ☐ Os que interrompem corrente de carga mas não interrompem corrente de curto-circuito: algumas chaves especiais conhecidas como "*Load Break Switchers*".
- ☐ Os que só interrompem correntes de magnetização: chaves comuns conhecidas como "*chaves secas*".

Todos os componentes (estáticos e dinâmicos) podem estar nos seguintes estados:

- ☐ **Reparo** : um componente está em reparo, quando está impedido de operar porque sofreu anteriormente algum tipo de dano ou apresentou alguma falha.

- ☐ **Manutenção** : um componente está em manutenção, quando ele está impedido de operar porque necessitou de revisão preventiva de rotina.
- ☐ **Operacional** : um componente está operacional, quando está em perfeitas condições de cumprir suas funções quando solicitado a operar.

Além das situações anteriores, os componentes dinâmicos podem estar em um quarto estado:

- ☐ **Stuck** : um componente dinâmico está em *stuck*, quando se recusa a operar quando é solicitado. É importante ressaltar que não se pode detectar previamente um caso de *stuck*.

Os componentes dinâmicos de uma subestação dividem-se em dois grupos: o grupo dos componentes **Normalmente Abertos (NA)** e o dos **Normalmente Fechados (NF)**. Pode-se dizer, então, que uma subestação está em seu **Estado Normal de Operação** quando todos os seus componentes dinâmicos que pertencem ao grupo dos NA estão realmente abertos e os que pertencem ao grupo dos NF estão realmente fechados, e além disso, todos os equipamentos se encontram no estado **operacional**.

O Modelo

Nesse trabalho, as subestações são representadas por um grafo não orientado. Um grafo G consiste de dois conjuntos V e E , onde V é um conjunto de nós ou vértices não-vazio, e E um conjunto de arcos não orientados.

A princípio poder-se-ia pensar como nós desse grafo todos os componentes estáticos da subestação, e como arcos, todos os componentes dinâmicos. Dessa forma, haveria a vantagem da facilidade de alteração da rede representativa, pois as operações (inserção e deleção) recairiam somente sobre os arcos. Porém, pensando na interface gráfica do sistema, que será discutida mais adiante, as linhas (cabos de ligação entre equipamentos) que são componentes estáticos ficariam melhor representadas por arcos, assim como um disjuntor que é um elemento dinâmico, ficaria melhor representado por um nó.

Para contemplar os aspectos visual e de operação, estipulou-se que todo componente dinâmico de uma subestação será representado no grafo como uma dupla *arco_nó*. O arco assume a dinamicidade e o nó o aspecto de equipamento. As linhas, embora estáticas, são arcos do grafo e os barramentos (linhas especiais) também são representados por uma dupla *arco_nó*.

Portanto, nesse grafo os nós representam todos os equipamentos passíveis de falha, reparo, manutenção e *stuck*, e os arcos, todos os componente de ligação, estáticos e dinâmicos.

A maioria das subestações de distribuição da CPFL operam de forma radial. Isto quer dizer que existe um único "caminho" para a energia, entre a fonte e cada um dos alimentadores. Algumas poucas subestações de distribuição operam com transformadores em anel. Para efeito de clareza, fica estabelecido que subestação de distribuição, a princípio, opera de forma radial, a não ser quando mencionado explicitamente o contrário.

Uma subestação em operação (em seu Estado Normal ou não), possui uma parte de seus componentes energizada e outra parte não. Os que estão energizados, se encontram nessa situação porque estão, de alguma forma, conectados à fonte (entrada de energia), podendo conter ou não corrente elétrica. Em contrapartida, os que estão desenergizados formam grupos de componentes, desconectados (em relação a fonte) por algum ou alguns componentes dinâmicos abertos.

Assim, uma subestação em operação é composta por vários conjuntos ou grupos de componentes conexos, sendo que somente um desses grupos contém todos os seus componentes energizados, enquanto que os demais possuem somente componentes desenergizados. Esses grupos, energizados ou não, formam as chamadas "*Ilhas*". Essas *Ilhas* podem ser classificadas em cinco tipos distintos:

- ☐ ***Ilha Principal***: Contém o nó *fonte* (Entrada de Energia). Todos os seus componentes estão energizados e grande parte de seus arcos contém corrente elétrica. A ilha principal é única.

- ☐ **Ilha Defeituosa:** Contém um elemento em reparo (defeituoso). Essa ilha se forma quando ocorre algum defeito em um componente da ilha principal. Com o isolamento desse, se forma uma ilha defeituosa.
- ☐ **Ilha em Manutenção:** Contém um componente em manutenção de rotina. Igualmente à anterior, ela se forma a partir da ilha principal quando um dos componentes da mesma entra em manutenção.
- ☐ **Ilha Inativa:** Contém todos os componentes (nós) operacionais, porém, estão inativos, ou seja, não estão energizados. Estes componentes geralmente são equipamentos auxiliares, usados no caso de uma necessidade de reenergização de emergência, quando algum componente da ilha principal necessita de reparo ou manutenção.
- ☐ **Ilha Alvo:** É um tipo especial de ilha inativa, que contém pelo menos um nó do tipo *saída* (tipo alimentador). Também é formada quando algum componente da ilha principal precisa ser isolado, e esse isolamento exige operações que interrompam a energia em algum alimentador. Vale ressaltar que uma ilha que contenha um ou mais nós saída e também um nó em reparo, é uma ilha *Defeituosa*, e não *Alvo*. O mesmo vale para uma ilha com nó em manutenção.

Sendo assim, o grafo representativo de uma subestação em operação, na verdade é um conjunto de subgrafos, cada um representando uma de suas Ilhas.

Devido ao fato das subestações de distribuição operarem, na maioria das vezes, de forma radial, o subgrafo que representa a Ilha Principal deve ter uma estrutura de árvore, ou seja, ele é conexo e sem ciclos.

Em alguns casos, uma subestação de distribuição pode não operar de forma radial, isto é, ela contém ciclos (anéis) na sua parte energizada (Ilha Principal). Dessa forma, para que seja mantida a estrutura de árvore no subgrafo que representa a Ilha Principal teríamos que substituir o anel (e seus componentes) por um único nó que o representasse. Isso pode ser feito, porque a quantidade de componentes que fazem parte do anel, em uma subestação de distribuição, é pequena. Assim sendo, mesmo uma subestação de distribuição

que não operasse de forma radial, poderia ser representada, em operação, por uma árvore.

A ênfase dada até aqui para as subestações de distribuição deve-se ao fato de que, a princípio, esse era o objeto principal desse trabalho. Contudo, pretendeu-se estender esse estudo a outros tipos de arranjos de subestação e não somente aos de distribuição. Como exemplo, podem ser citadas as subestações de transmissão, que possuem arranjos maiores e mais complexos do que as de distribuição devido à quantidade de energia com que operam. Em geral, o arranjo de uma subestação de transmissão é projetado para operar de forma não radial, uma vez que isso aumenta sua confiabilidade. Essa preocupação se deve à sua importância dentro de um sistema elétrico de transmissão.

Com isso, notou-se que para estender esse trabalho a outros arranjos, e não somente aos de distribuição, deveria ser considerado o fato de que alguns estados normais de operação são não radiais. Tentar manter a estrutura de árvore, empregando o método de substituir cada possível anel (ciclo) por um único nó, como era feito para os arranjos de subestações de distribuição, mostrou-se inviável. Isso porque nos arranjos de subestações de transmissão, por exemplo, um único anel poderia conter um número muito grande de componentes, dificultando esse tipo de abordagem, e impossibilitando a visualização gráfica conforme se pretendia.

Além do mais, no decorrer desse trabalho, percebeu-se que mesmo as subestações de distribuição que operam radialmente são obrigadas a formar anéis (ciclos) em alguns breves momentos. Isso ocorre quando da necessidade de se colocar algum equipamento em manutenção. O anel é formado justamente para evitar que haja um "pisca", ou seja, uma interrupção momentânea em algum alimentador (ver figura PR3).

Por estes motivos, optou-se por desenvolver um novo método para representar esses anéis, aproveitando a estrutura de árvore na representação de um estado normal de operação. Esse método permite que os anéis possam ser criados e destruídos de uma forma mais rápida e dinâmica. Com ele, pôde-se

representar qualquer arranjo de subestação em operação, radial ou não, mantendo a estrutura de árvore. Esse método será explicado mais adiante.

Da mesma forma, as demais Ilhas de uma subestação em operação, e não somente a Ilha Principal, puderam ter seus subgrafos representativos com estrutura de árvore. Essa possibilidade facilita operações que alteram a topologia dos arranjos de subestações. Um fechar ou abrir de uma chave pode significar, respectivamente, a união de dois subgrafos para formar um novo subgrafo, ou a formação de dois novos subgrafos a partir de um único subgrafo. Se os subgrafos tiverem estrutura de árvore, essas operações ganham em eficiência computacional.

Resumindo o que foi dito anteriormente, toda subestação é representada por um grafo. Esse grafo, a princípio, é conexo e só passa a ser um conjunto de subgrafos, quando ele representar uma subestação em operação, que como já vimos, na maioria das vezes opera de forma radial. Quando da entrada em operação da subestação, são formadas as Ilhas Principal e Inativas, conforme descrito anteriormente. Com a possibilidade de representar cada uma dessas ilhas (subgrafos) por árvores, podemos dizer que, na verdade, uma subestação em operação é representada por uma *floresta*. Essa floresta se forma quando se retiram do grafo representativo inicial, os arcos (componentes dinâmicos) normalmente abertos. Essa inicialização, ou seja, modificar a topologia do grafo representativo inicial para que ele assuma uma forma que represente a subestação em seu *Estado Normal de Operação* (floresta), será detalhada mais adiante.

Assim, uma subestação em operação é representada por uma floresta composta por árvores em preordem [Jen] (figura PR1). Novamente, para fins de clareza, no contexto de representação simbólica de uma subestação, uma Ilha é um subgrafo com estrutura de árvore em **preordem**.

Preordem é um tipo de ordenação onde cada nó aparece depois de seus ancestrais. Para que consigamos manter essa estrutura implementada, precisamos de dois índices denominados *fio* e *arco_que_liga_ao_pai*. Este último, como o próprio nome já diz, é um índice que indica o arco que liga o nó

a seu ancestral direto (pai). O conjunto desse índice representa os arcos que compõem a árvore (base) em uma determinada configuração. O *fio* é a "costura" que determina a sequência dos nós na árvore.

Árvore em Preordem

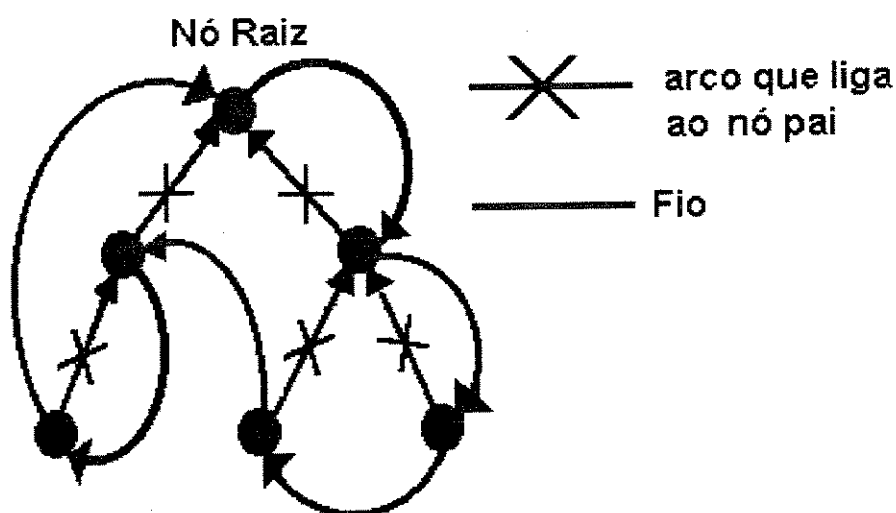


figura PR1

A identificação de cada ilha (independentemente de seu tipo), se dá através da "coloração" de seus nós. Mais claramente, toda ilha existente, ou que possa vir a se formar durante as operações, possui um identificador ("cor"). Todos os nós dessa ilha então, são "pintados" dessa "cor". Essas "cores" são muito importantes, pois, através delas, pode-se saber quais nós pertencem a uma determinada ilha, sem ter que percorrer a respectiva árvore; pode-se detectar a formação de um ciclo; e, como será discutido mais adiante, essas cores são usadas para auxiliar a determinação de operações ótimas (*Problema de Reenergização de Emergência*) para o restabelecimento do fornecimento de energia.

Formação da Floresta a Partir do Grafo Conexo Inicial.

Como foi visto anteriormente, inicialmente toda subestação pode ser representada por um grafo conexo. Contudo, pode-se dizer que esse grafo não representa o *estado normal de operação* da subestação, pois componentes dinâmicos (arcos) normalmente abertos que deveriam ser excluídos do grafo, constam desse grafo inicial. Esses arcos, então, precisam ser retirados. Outro fator que afasta o grafo inicial da situação operacional real, é o não conhecimento do valor da corrente elétrica nos arcos.

O próximo passo, então, é transformar esse grafo conexo em uma floresta, com a corrente elétrica corretamente distribuída pela árvore *principal*. Isso é feito em dois passos (figura PR2):

- Primeiro: É utilizado um algoritmo para o *Problema De Fluxo De Custo Mínimo (PFCM)*, atribuindo-se um custo muito alto para os arcos que devem ser excluídos (componentes normalmente abertos). Como resultado, temos a exclusão de alguns desses arcos (mantidos fora da base) e a correta distribuição de fluxo (corrente elétrica). Contudo, ainda não temos a floresta, mas sim uma única árvore (*Árvore do PFCM*).
- Segundo: Essa árvore única contém alguns arcos de alto custo que devem ser retirados. Utiliza-se um algoritmo para percorrer a Árvore do PFCM, retirando esses arcos, formando-se assim as árvores (ilhas) inativas e a árvore Principal. Tem-se então, a *floresta inicial*. Pode haver casos em que uma subestação não opere de forma radial, isto é, ela contém ciclos na Ilha Principal (podendo haver ciclos também em outras Ilhas). Nesse caso, após o primeiro passo, deverá haver arcos com custo baixo fora da base (justamente aqueles arcos normalmente fechados que formam os ciclos). Então, completando o segundo passo, há um algoritmo que identifica esses arcos e os insere em suas respectivas ilhas, formando os anéis (ciclos), mantendo porém, a estrutura de árvore, como será explicado mais adiante.

Vale ressaltar que no primeiro passo é verificada a conectividade do grafo representativo inicial. Se por algum erro do usuário, no momento da composição do grafo, o mesmo ficou incompleto (não colocação de um arco,

por exemplo), comprometendo sua conectividade, essa situação será identificada e a execução do programa interrompida.

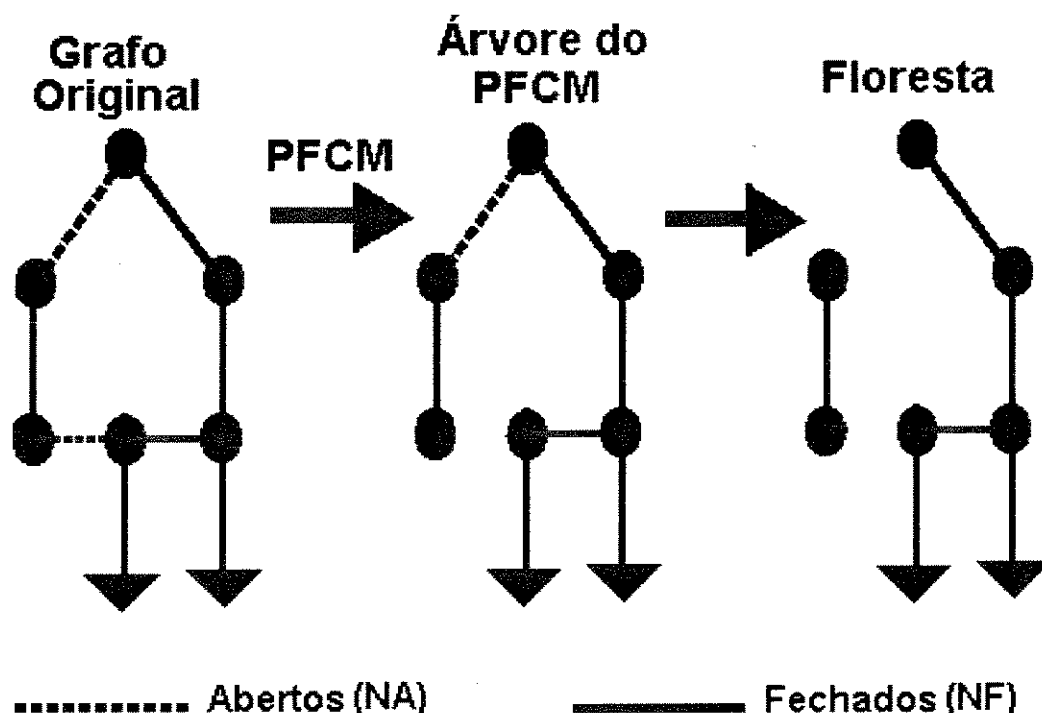


figura PR2

Tratamento de Ciclos: Nós Artificiais e Falsos Arcos

Como foi citado anteriormente, em algumas manobras em subestações, quando se deseja colocar algum equipamento em manutenção, é preciso fazer o que se chama de *operação em anel*. Essa operação consiste em formar um ciclo (fechando alguma chave, por exemplo) que contenha o equipamento a entrar em manutenção. Isso impede que haja interrupção momentânea no fornecimento de energia (*pisca*) quando o equipamento for isolado, uma vez que o fluxo de corrente elétrica encontra um outro "caminho" para seguir (figura PR3).

Operação em Anel

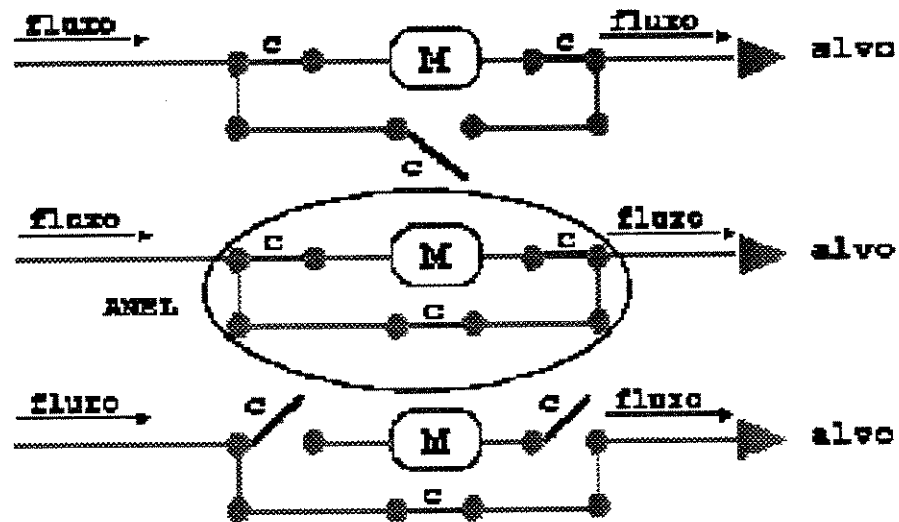


figura PR3

No modelo de árvores em preordem, a simulação desse tipo de manobra exigiria a inclusão de um novo arco, e isso, implicaria na perda de arborescência. Também, como todos os algoritmos desenvolvidos baseiam-se em manipular uma estrutura de árvore, necessitar-se-ia de uma revisão e talvez reescrevê-los.

Para utilizar as vantagens da estrutura de árvore, criou-se uma nova entidade que passou a ser chamada de "*nó artificial*". Dessa forma evita-se a perda de arborescência, pois toda a vez que um arco precisar ser incluído (formar *anel*), cria-se um nó artificial incluindo-o também na árvore, mantendo-se o número de arcos igual ao número de nós menos um ($k=n-1$; $k = \# \text{ arcos}$, $n = \# \text{ nós}$). Esse novo nó "herda" todas as características do nó ao qual espelhou, isso é, ele tem os mesmos atributos (campos e valores dos campos) do nó real.

Dessa forma, o arco a ser incluído torna-se um "*falso arco*", uma vez que ele une um nó real a um nó artificial. Mantém-se assim a mesma

em cada um de seus ramos assumem valores praticamente iguais e dessa forma, a corrente se divide igualmente entre eles. Por outro lado, o mesmo não ocorreria no caso de um anel conter um único transformador, pois conforme foi comentado, o fato da impedância do transformador ser maior que as outras envolvidas, faria com que praticamente toda a corrente passasse pelo ramo do ciclo que não contivesse o transformador. Contudo, os arranjos das subestações não permitem, topologicamente falando, que se formem ciclos contendo somente um transformador. Novamente, segundo o especialista, quando em uma subestação há a possibilidade, devido a disposição de seu arranjo, de se formar um anel contendo mais de um transformador, com certeza eles estarão em ramos diferentes e terão a mesma capacidade (idênticos), e dessa forma terão praticamente a mesma impedância, o que faz com que a corrente elétrica se divida igualmente entre eles. Baseado nesses fatos, quando da formação de um anel, o SE2 divide a corrente elétrica (total passante no anel) igualmente entre seus ramos, seja um ciclo contendo transformadores ou não.

No futuro, espera-se que o valor da corrente elétrica em cada arco possa ser lido diretamente de vários pontos da subestação real por um sistema de monitorização, e passado para o Sistema Especialista, não sendo mais necessário estimá-lo.

Acoplamento com a Interface Gráfica.

Como o grafo definido representa o *unifilar* de toda subestação, seria conveniente ter uma visão gráfica desse mesmo unifilar. Essa visão gráfica por sua vez, deveria acompanhar o "*layout*" padrão utilizado na CPFL, uma vez que este é familiar às pessoas que trabalham com subestações. Isso permitiria acompanhar melhor as alterações da topologia à medida que os eventos fossem ocorrendo. A interface gráfica desenvolvida permite essa visão, assim como a interação do usuário com o sistema, permitindo a ele (usuário) atuar sobre a topologia de uma forma clara e simples.

Com a utilização de cores, o usuário pode identificar facilmente todas as ilhas existentes na subestação, vislumbrando quais equipamentos estão

"quentes"(energizados), quais estão isolados (para reparo ou manutenção), quais são os alimentadores desenergizados, etc. Além disso, cada tipo de equipamento possui uma representação própria, o que facilita sua identificação. A interface utiliza dados contidos nos arcos e nós do grafo para apresentá-los na tela. Esses dados são: as coordenadas x,y normalizadas, o estado dos elementos dinâmicos (aberto ou fechado), o tipo de cada componente e a "cor" (define a que "ilha" cada componente pertence).

Com o uso do "mouse" o usuário pode modificar a topologia da subestação (sempre com a supervisão do Sistema Especialista), abrindo e fechando chaves e disjuntores, simulando falhas e pedindo manutenção preventiva, além de poder alterar atributos dos equipamentos.

É também através da interface gráfica que o SE2 se comunica, escrevendo mensagens na tela, informando suas ações e suas conclusões. Na figura PR5 é mostrado o "layout" de uma subestação vista na tela do SE2.

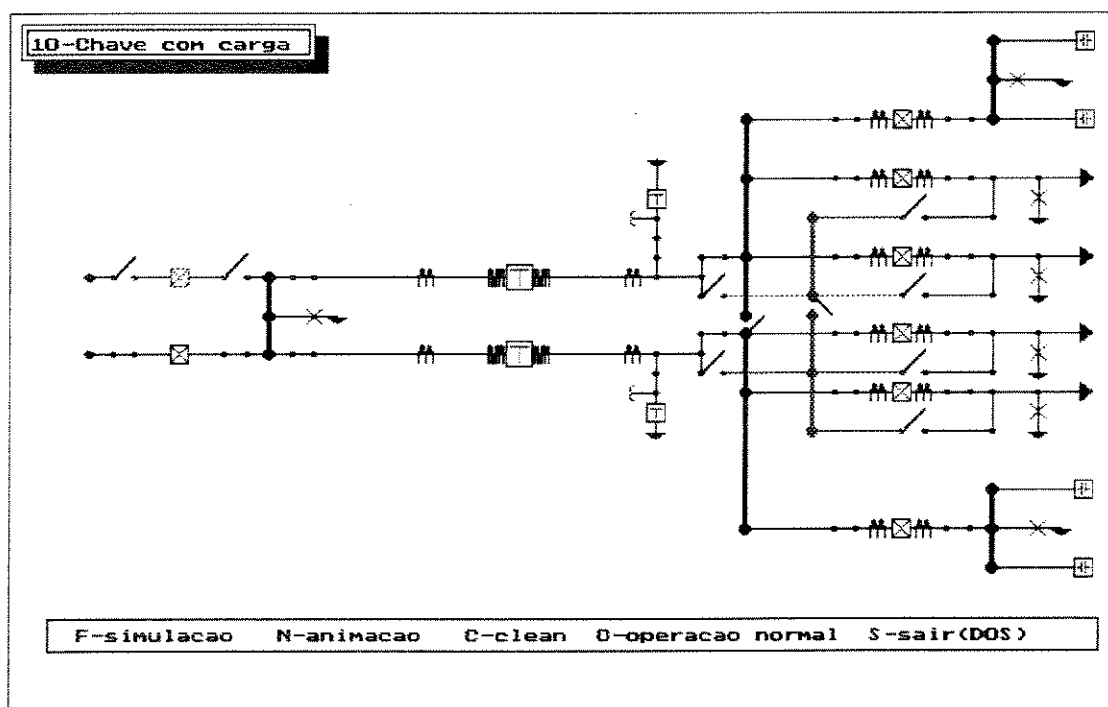


figura PR5

3.2 - O Sistema Especialista

Considerações Iniciais

Um *Sistema Especialista* (SE) é um sistema computacional que tem como objetivo reproduzir atitudes ou decisões de um especialista humano em uma determinada área de interesse.

O desenvolvimento de um sistema especialista é um processo consistente para preservar, transferir, e documentar o conhecimento. Embora esse desenvolvimento seja trabalhoso e às vezes caro, torna-se justificável em casos onde o conhecimento é escasso, ou quando é necessário aplicá-lo em muitos locais diferentes, ou mesmo quando o ambiente de aplicação é extremamente hostil para um ser humano.

Uma das características de um "especialista artificial" é justamente sua imunidade ao desgaste e sua capacidade de reproduzir atitudes constantes frente a uma mesma situação, posto que o ser humano desgasta-se facilmente em atividades que requerem muito esforço físico ou mental. Qualquer período significativo de tempo de trabalho reduz seu desempenho, sendo que também diferentes decisões, em situações idênticas, podem ser tomadas devido a fatores emocionais ou ao cansaço. Essa característica dos SE's, no entanto, faz com que eles tornem-se restritos, devido à falta de criatividade e de inovação. O ser humano nesse ponto é imbatível, podendo reorganizar informações para sintetizar novos conhecimentos, criando analogias com situações de outros domínios.

Outra característica de um SE é a facilidade de transferir e reproduzir seu conhecimento. Basta copiar o sistema ou a base de dados, enquanto que para o homem esse é um trabalho difícil e demorado, que requer estudo, aprendizado e treinamento. Por outro lado, os SE têm dificuldade, para não dizer incapacidade, de "aprender" diante de novos fatos. Os "experts" humanos utilizam-se de sua capacidade de interagir com o meio onde atuam, adaptando-se a novas situações e articulando novas estratégias de ação. Um

fator importante que diferencia o "especialista artificial" do humano é que em várias situações, além do conhecimento técnico, deve haver uma "boa dose de *bom senso*".

Devido a esses fatores, em muitas aplicações o especialista humano trabalha conjuntamente com o SE, a fim de se completarem , superando assim as limitações de cada um.

Representação Do Conhecimento Baseada Em Regras

Um sistema especialista é composto por uma *máquina de inferência* e uma *base de conhecimento* . Neste trabalho, essa base de conhecimento é representada por fatos e regras. É através das regras e da utilização de informações contidas nos fatos, que o sistema especialista pode chegar a conclusões, disparar ações ou outras regras. Esse tipo de representação do conhecimento é chamado de *Baseado em Regras*.

Os fatos, nesse caso, são extraídos do próprio grafo representativo da subestação, como por exemplo, tipo de cada equipamento, estado de cada ilha (isolada para reparo, isolada para manutenção, etc.) , valor do fluxo de carga em cada linha, e outros.

As regras, por sua vez, são do tipo " *SE <condições forem verdadeiras> ENTÃO <ação>* ".

Exemplo 1:

regra_1:

SE A é verdadeiro e
B é verdadeiro

ENTÃO

conclua C é verdadeiro (ou execute C)

regra_2:

SE C é verdadeiro

ENTÃO

conclua D é verdadeiro

Exemplo 2 - as regras acima podem ser expressas simplesmente como:

A & B -> C
C -> D

Há dois tipos de controle de inferência. Um conhecido como *Encadeamento para Frente (Forward Chaining)*, e outro conhecido como *Encadeamento para Trás (Backward Chaining)*. No primeiro, tomando como exemplo o conjunto de regras acima, o sistema avalia se as condições da regra_1 são satisfeitas (A e B serem verdadeiros) e caso isso ocorra, o sistema conclui que C é verdadeiro (ou executa alguma ação). Esse novo fato (C ser verdadeiro) pode ser usado para disparar novas regras e chegar a novos fatos (no exemplo acima, C ter sido definido como verdadeiro pela regra_1, faz disparar regra_2 definindo D como verdadeiro). Nesse tipo de controle, tomando o exemplo 2 acima, o sistema usa informações contidas no lado esquerdo (dados ou fatos) para inferir as informações contidas no lado direito. Por isso essa técnica de controle é conhecida como "Orientada a Dados".

Na técnica de controle do tipo Backward Chaining, o sistema parte de um objetivo (uma hipótese) e o sistema executa as regras que possam confirmá-lo. No exemplo anterior, o sistema parte do princípio de que D é verdadeiro e executa as regras necessárias para provar essa hipótese. No caso, D será verdadeiro se por sua vez, C for verdadeiro. Provar que C é verdadeiro é um novo objetivo ou um sub-objetivo, e para "alcançá-lo" é preciso avaliar A e B, continuando a inferência. Essa técnica é conhecida como "Orientada a Objetivo".

Nesse trabalho, o método de controle utilizado é o **Encadeamento para Frente** ou **Forward Chaining**. Essa escolha se deu principalmente pelo fato do Encadeamento para Trás não se enquadrar muito bem no contexto desse trabalho, uma vez que, como discutido no parágrafo anterior, ele exige a definição de um objetivo a fim de que o processo de inferência possa ser iniciado. A definição a priori desse objetivo é que dificulta a sua utilização, uma vez que a princípio, poderia haver mais de um objetivo a ser colocado para iniciar o processo de inferência. Haveria então um esforço computacional para

definir qual desses objetivos poderia ser o melhor para determinado caso. Para ilustrar esse fato, tomemos como exemplo a ocorrência de uma falha em algum componente de uma subestação. Após o isolamento do componente para efetuar o reparo, haverá a necessidade de serem efetuadas manobras com chaves, para reenergizar possíveis alimentadores, que com a ocorrência da falha, ficaram sem energia.

Essas manobras farão com que a subestação, partindo de um "estado inicial" (referindo-se a sua topologia, e que seria representada por um conjunto de Ilhas) onde há vários alimentadores desenergizados, ou seja, várias Ilhas Alvo, faça a transição para um "estado final", com o maior número de alimentadores energizados. Esse "estado final" seria então o objetivo com o qual se iniciaria o processo de inferência. Contudo esse "estado final", devido ao número de componentes dinâmicos de uma subestação, pode ter várias configurações, resultado das possíveis combinações desses componentes (abertos ou fechados), que resultam na reenergização dos alimentadores isolados. Dessa forma, haveria a dificuldade de definir qual das possíveis "combinações" para esse "estado final" deveria ser utilizada pelo sistema como o objetivo.

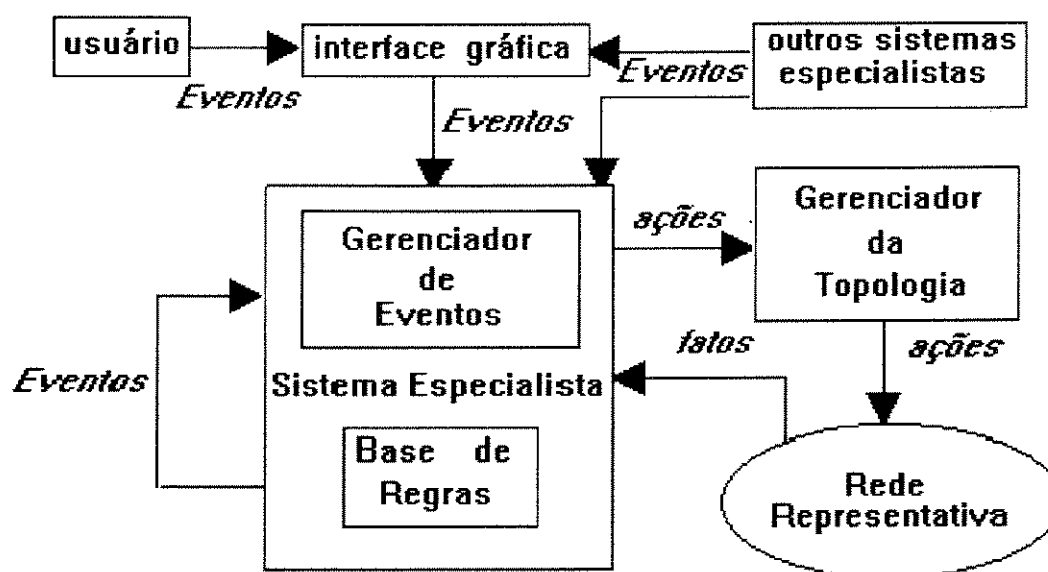
Com o controle do tipo Forward Chaining, o "estado final" vai sendo "desenhado" no próprio processo de inferência, tornando o processo mais natural e evitando esforço computacional desnecessário.

Conhecimento sobre o Conhecimento: Metaknowledge

Geralmente, um sistema especialista possui um número razoável de regras e, dessa forma, é necessário saber quais delas precisam ser avaliadas para determinada situação. Caso todas elas fossem avaliadas em cada situação, poderia haver uma perda de performance que talvez comprometesse a utilização desse sistema especialista. Esse tipo de conhecimento é o que pode ser chamado de "*metaknowledge*", ou seja, é o conhecimento de como se usar o próprio conhecimento sobre um determinado problema.

Descrição do Sistema Especialista:

Neste trabalho, o sistema especialista é um tipo de monitor. Ele monitora e avalia todas as possíveis ações sobre a topologia da subestação. Toda ação do usuário sobre a rede representativa tem que primeiro ser avaliada por ele, que pode então autorizar ou não certas manobras, assim como desencadear uma série de ações que ele achar conveniente.



Esquema dos Módulos do Sistema

Pode-se dizer que o sistema especialista responde a *eventos*. Um *evento*, então, seria toda tentativa de manipular a topologia da rede, podendo ser disparado pelo usuário. São exemplos de eventos: abrir ou fechar uma chave, pedir reenergização de emergência, pedir a simulação de uma falha em algum componente, entre outros. Os eventos também podem ser disparados pelo próprio sistema especialista. Por exemplo: no caso de uma resposta a uma

reenergização de emergência, o sistema especialista dispara eventos para poder abrir ou fechar os componentes dinâmicos necessários à operação.

Dessa forma , há uma entidade responsável pelo gerenciamento desses eventos chamada de *Gerenciador de Eventos (GE)* . Esse gerenciador funciona como um "*metaknowledge*", pois é ele que informa à máquina de inferência quais regras devem ser avaliadas para cada evento, evitando-se assim que regras alheias a ele sejam avaliadas inutilmente .

Portanto, para cada evento que ocorrer, o Gerenciador de Eventos define um *contexto*. Por *contexto de um evento* entende-se um conjunto formado pelo equipamento (dinâmico ou estático) sobre o qual ocorreu o evento, por um subconjunto de regras (do conjunto total de regras) a ser avaliado e pelo estado atual da topologia e dos demais equipamentos (fatos). Dessa forma, para um mesmo tipo de evento, pode haver vários contextos, uma vez que eventos podem ocorrer em diversos equipamentos e em situações diversas.

A Máquina de Inferência

Máquina de Inferência desenvolvida para esse trabalho [Nea] é bem simples e dedicada, ou seja, está contida no próprio código do sistema especialista. Atualmente não pode ser utilizada por outro sistema. Possui ainda, a característica de trabalhar sobre um determinado conjunto de regras, definido pelo Gerenciador de Eventos conforme explicado anteriormente.

Uma vez definido o contexto, a *máquina de inferência* percorre indefinidamente o subconjunto de regras referente àquele contexto, avaliando as premissas, gerando novas conclusões, novas ações ou novos eventos. Esse "*loop*" pelo conjunto de regras do contexto só é encerrado quando é disparada uma regra especial chamada de *Regra de Definição de Evento*. Ela informa à máquina de inferência que o processo terminou, concluindo se o evento teve "sucesso" ou não.

Cada regra de um subconjunto de regras se enquadra em dois tipos:

- **Regra de Definição de Evento:** Como visto anteriormente, ela define o sucesso ou fracasso de um determinado evento, encerrando o processo de inferência. Uma outra característica importante dessa regra é que somente ela pode disparar ações que atuam diretamente na topologia (grafo) , ações essas que são recebidas e acionadas pelo **Gerenciador da Topologia (GT)**, gerando novos fatos. Em um mesmo subconjunto de regras de um evento, pode haver mais de uma regra desse tipo.
- **Regra de Contexto:** São as demais regras de um subconjunto. Elas podem agir na topologia somente de forma indireta, ou seja, suas ações se resumem em disparar novos eventos, que por sua vez serão tratados pelo Gerenciador de Eventos que definirá novos contextos.

Pela característica apresentada acima, de uma regra de contexto poder disparar novos eventos, fica claro o caráter "*reentrante*" do processo de inferência, onde para se determinar o "sucesso" ou "fracasso" de um evento em um determinado contexto, há a necessidade de avaliar um novo evento, ou novos eventos.

Para exemplificar, veremos como a máquina de inferência trabalha sobre um subconjunto de regras referente ao evento **ABRIR ELEMENTO DINÂMICO k - EA(k)**, onde **REAx** significa **Regra** número x do evento **EA**.

REA1:

Se

K está com corrente elétrica .E.

K é chave do tipo *Seca* .E.

K não pertence a *anel*

Então

Conclua : **K_PODE_SER_ABERTA = FALSE**

REA2:

Se

K não está com corrente elétrica .OU.

K não é chave do tipo *Seca* .OU.

K pertence a *anel*

Então

Conclua : **K_PODE_SER_ABERTA** = TRUE

REA3 *

Se

K_PODE_SER_ABERTA == TRUE

Então

ação: abrir elemento dinâmico *K* (Gerenciador de Topologia)

concluir: evento **EA(k)** = SUCESSO

REA4 *

Se

K_PODE_SER_ABERTA == FALSE

Então

concluir: evento **EA(k)** = FRACASSO.

☐ **K_PODE_SER_ABERTA** é uma "*conclusão de contexto*".

Conclusões de contexto são variáveis locais que podem assumir três valores: *Verdadeiro*, *Falso* ou *Indefinido*. Inicialmente assumem o valor *Indefinido*, mantido até que alguma regra de contexto altere seu valor (para *Verdadeiro* ou *Falso*) quando disparada. Isso impede, no exemplo acima, que as regras 3 e 4 possam ser disparadas antes da definição da conclusão de contexto.

☐ **REA3** e **REA4** são *Regras de Definição de Evento*.

No conjunto de regras do evento EA descrito acima, o processo de inferência se dará da seguinte forma: suponha que o evento EA seja disparado na tentativa de se abrir um disjuntor. Mesmo que a máquina de inferência comece a avaliar o conjunto começando pela regra **REA3** (embora ela siga a ordem em que as regras são escritas), ela não será disparada uma vez que a conclusão de contexto **K_PODE_SER_ABERTA** está com valor *Indefinido*. Dessa forma, as regras **REA3** e **REA4** só poderão ser disparadas depois das regras **REA1** ou **REA2**. Por se tratar de um disjuntor, a regra **REA1** não tem sua premissa satisfeita, uma vez que o disjuntor não é uma chave seca. Já na avaliação de **REA2**, **K_PODE_SER_ABERTA** será definida como

verdadeira. Continuando na avaliação das regras, a máquina de inferência avalia a regra **REA3** que agora é disparada, permitindo a abertura do disjuntor, concluindo o sucesso do evento EA e terminando a inferência no contexto.

Lista de Eventos:

A seguir são listados os eventos tratados pelo SE2:

- ☐ **Abrir Elemento Dinâmico K - EA(k):** requisitar ao sistema especialista a abertura de uma chave, disjuntor ou religador.
- ☐ **Fechar Elemento Dinâmico K - EF(K):** requisitar ao sistema especialista o fechamento de uma chave , disjuntor ou religador.
- ☐ **Isolar Equipamento N - EISOLA(n) :**requisitar manobras para o isolamento de um equipamento .
- ☐ **Falha em Equipamento N - EFALHA(n):** avisar ao sistema especialista que houve uma falha no equipamento, devendo ser isolado para reparo.
- ☐ **Colocar Equipamento N em Manutenção - EMAN(n) :** requisitar ao sistema especialista manobras para colocação do equipamento em manutenção.
- ☐ **Restabelecer Estado Normal de Operação - ERNO:** requisitar ao sistema especialista manobras para o restabelecimento do *estado normal de operação* da subestação.
- ☐ **Encontrar Solução Desbloqueante para Elemento Dinâmico K - EESD(k):** Requisitar manobras auxiliares para fechar uma chave do tipo *seca* sobre carga (corrente).
- ☐ **Reenergização de Emergência - ERE :** Requisitar manobras para restabelecimento de energia a alimentadores após interrupção causada por uma falha.

- ☐ **Isolar Alimentadores por Prioridade - EPRIORI** : Isolar alimentador(es) após constatar que não há condições de alimentá-lo(s) sem que haja sobrecarga em algum componente da subestação.
- ☐ **Encontrar "Caminho Mínimo" - ESP** : encontrar conjunto de elementos dinâmicos a serem fechados a fim de conseguir reenergização de emergência ou formação de anel para manutenção em equipamento.

3.3 - Reenergização

Um aspecto importante desse trabalho é fazer com que o Sistema Especialista SE2 sugira ou execute ações corretivas para reenergização de alimentadores, que ficaram sem carga devido a falhas ocorridas na subestação, ocasionando interrupção no fornecimento de energia. Após detectada e localizada, a falha é isolada, através da abertura de chaves e disjuntores, iniciando-se logo após, as operações necessárias ao restabelecimento do fornecimento de energia aos alimentadores. É importante lembrar que, nesse capítulo, tudo o que se refere a alimentadores (em subestações de distribuição), também se aplica a linhas de transmissão (em subestações de transmissão).

Vale ressaltar, como já foi dito anteriormente, que o SE2 já sabe, ou deveria saber, onde ocorreu a falha, ou melhor, em qual equipamento da subestação houve o problema. Essa informação deve ser passada ao SE2 pelo usuário ou por um outro sistema especialista, sendo muito importante para o sucesso da operação. Ações impróprias podem gerar danos a equipamentos e até acidentes com os operadores. Sendo assim, conhecendo-se com exatidão onde a falha ocorreu, facilita-se a adoção de medidas corretas e seguras.

Quando do advento de uma falha em um equipamento da subestação, os mecanismos de proteção (disjuntores e religadores) tratam de interromper a corrente elétrica no elemento defeituoso que, na maioria das vezes, corta o fornecimento de energia aos alimentadores da subestação, significando corte de energia aos consumidores. Essa interrupção pode durar até que o defeito seja isolado e medidas corretivas de reenergização possam ser tomadas, ou na pior das hipóteses, durar até que o equipamento possa ser reparado. Na segunda hipótese, pouca coisa pode ser feita, a não ser torcer para que o reparo seja realizado rapidamente. Na primeira, porém, as operações de reenergização podem solucionar o problema, pelo menos para a maioria dos alimentadores, encontrando novos caminhos para reenergizá-los.

Essas operações de reenergização são medidas emergenciais e, por isso, temporárias, e que através de manobras com chaves, disjuntores e religadores, buscam o seguinte objetivo:

- ☐ Diminuir a quantidade de energia não suprida, tentando realimentar o maior número possível de alimentadores, obedecendo restrições e prioridades.

Devido à quantidade de componentes dinâmicos presentes em uma subestação, pode haver várias maneiras de se alcançar tal objetivo, resultado da combinação das manobras com esses componentes. O que se tem, então, são vários conjuntos de manobras, cada um expressando uma maneira particular de se conseguir a reenergização do maior número possível de alimentadores. A escolha de qual dos conjuntos apresenta a melhor solução para se atingir o objetivo proposto, deve obedecer os seguintes critérios:

- ☐ Dar preferência àqueles conjuntos de manobras que aumentem a segurança e proteção contra novas falhas.
- ☐ Entre os possíveis conjuntos de manobras que obedecem o item anterior, escolher aquele que possui o menor número de manobras. Em caso de empate, escolher aquele conjunto de manobras que faça com que o estado final (situação topológica da subestação após realizadas as manobras e a conseqüente reenergização) fique o mais próximo possível do Estado Normal de Operação.
- ☐ Descartar aqueles conjuntos que, mesmo atendendo aos critérios anteriores, cause sobrecarga em algum equipamento.

O primeiro critério mostra a preocupação com a ocorrência de uma nova falha durante o período em que um ou mais equipamentos estão em reparo ou manutenção. Quanto maior a preocupação em encontrar uma configuração de reenergização de emergência com grau de proteção maior, menor será o impacto de uma nova falha na subestação. Como exemplo prático, pode-se citar o fato de um operador preferir usar um ou mais disjuntores a usar uma única chave em uma operação de reenergização. Esses disjuntores podem evitar que as conseqüências de uma nova falha se alastrem pelo restante da subestação.

O segundo critério busca diminuir a quantidade de energia não suprida, uma vez que essa quantidade, além de depender do número de alimentadores que são reenergizados, depende também do tempo de operação de reenergização, que por sua vez depende de como ela é realizada. Assumindo que o tempo gasto nessa operação é diretamente proporcional ao número de manobras com chaves e disjuntores que o operador tem que realizar, o conjunto com o menor número de manobras (obedecendo os outros critérios) é o que pode contribuir mais positivamente na diminuição da quantidade de energia não suprida. Em caso de empate, a preferência pelo conjunto de manobras que aproxima o estado final ao Estado Normal de Operação (parte das manobras são, por exemplo, fechar componentes dinâmicos *Normalmente Fechados*, mas que com a falha foram abertos e vice-versa) faz com que, após o reparo do equipamento isolado (devido à falha), o retorno ao Estado Normal de Operação da subestação seja mais fácil, isto é, que o número de manobras necessárias para estabelecê-lo não seja grande, o que pode evitar novos transtornos, como por exemplo, um erro de operação que cause a desenergização de algum alimentador.

O último critério é uma restrição que mede a factibilidade da solução encontrada. Não adianta encontrar um caminho de reenergização até aos alimentadores, com uma boa proteção contra novas falhas, se ele causar sobrecarga em algum equipamento, o que poderá resultar uma nova interrupção no fornecimento de energia, com conseqüências maiores que a anterior. A questão de sobrecarga deve ser tratada pelo SE2, no que diz respeito ao índice que ela atinge. Sobrecargas suportáveis são impostas aos equipamentos com o objetivo de diminuir a energia não suprida. Essas grandezas estão relacionadas diretamente com o tempo ao qual o equipamento fica submetido à sobrecarga. Do ponto de vista do SE2, essas grandezas podem ser pré-definidas ou, futuramente, conhecidas em tempo real.

Para um operador experiente, um especialista, praticamente não há dificuldade em encontrar uma solução adequada para uma operação de reenergização de emergência. Ele geralmente conhece bem a subestação e sabe

regras de operação. Isso lhe permite manobrar o menor número de chaves e disjuntores a fim de restabelecer o suprimento de energia aos alimentadores, atentando para a segurança, a proteção e o cuidado com possíveis sobrecargas.

De alguma forma esse conhecimento necessita ser representado para que o Sistema Especialista possa desempenhar o papel para o qual foi proposto. Há nesse conhecimento dois conceitos que a princípio são triviais, mas cuja representação apresenta certa complexidade. Um deles é o conceito de quantidade. O Sistema Especialista precisa aprender a escolher entre as possíveis soluções factíveis, aquela(s) com baixo número de manobras. O outro conceito é sobre qualidade. Como fazer com que ele escolha entre o conjunto de possíveis soluções de menor número de manobras, aquela que provavelmente seja a melhor naquele contexto. Infelizmente, para uma possível abordagem matemática, a melhor solução não é simplesmente aquela com o menor número de manobras e vice-versa. Isso se deve a fatores relacionados a segurança e proteção que devem ser levados em consideração.

Pode-se citar dois exemplos que esclarecerão melhor sobre como esses fatores (segurança e proteção) influem na escolha das manobras para a operação de reenergização de emergência. Nas figuras utilizadas neste texto, os quadrados vazados representam disjuntores abertos e os quadrados preenchidos representam disjuntores fechados.

□ *Exemplo 1 : segurança*

Suponha que um operador tenha duas opções possíveis para reenergizar os alimentadores A,B e C na figura AC1.

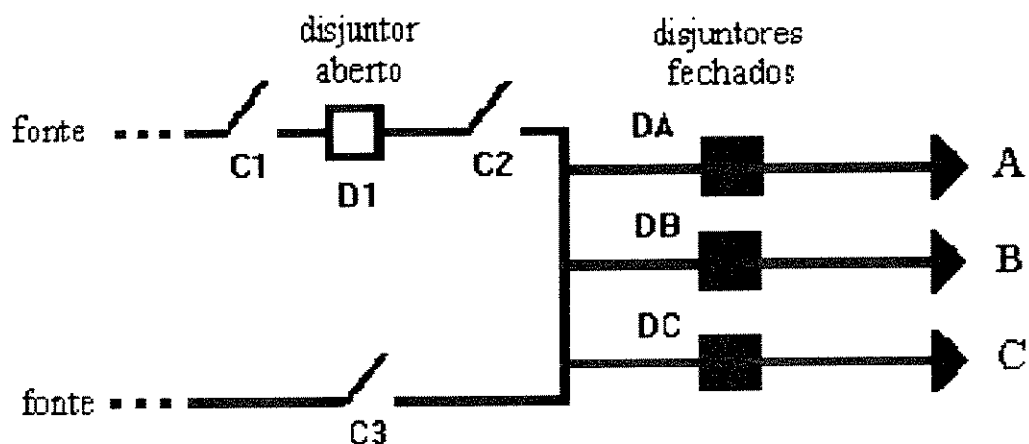


figura AC1

Se levássemos em conta somente o número de manobras, fica claro que a operação com menor número delas seria fechando a chave **C3**. A proteção contra novas falhas fica garantida pelos disjuntores **DA**, **DB** e **DC** isolando a subestação de possíveis falhas que possam ocorrer em qualquer um dos três alimentadores. Porém, deve-se notar que nesse caso há um importante fator de segurança que deve ser considerado: supondo que a chave **C3** seja uma tripolar seca é perigoso fechá-la, pois haverá corrente passando por ela. Se por algum motivo ela não se encaixar em seus contatos perfeitamente, haverá o risco do conjunto da chave ser danificado. Se por outro lado um operador tentar refazer a manobra, abrindo-a para depois fechá-la novamente, ele cometerá um ato ainda mais perigoso, pois estando a chave sobre carga, sua abertura poderá causar a formação de um arco elétrico que além de danos materiais, provavelmente causará danos físicos a ele.

A atitude correta seria então, antes de se fechar a chave **C3**, abrir os disjuntores **DA**, **DB** e **DC** para que não houvesse corrente em **C3** no momento em que fosse fechada. Dessa forma, a solução encontrada, levando em consideração somente o menor número de manobras, teve, por motivos de segurança, a necessidade da abertura dos três disjuntores, tornando-a mais

complexa. O que a princípio teria somente uma manobra (fechar **C3**), acabou necessitando de sete (abrir **DA**, **DB** e **DC** ; fechar **C3** ; fechar **DA**, **DB** e **DC**).

Dessa forma, ao contrário do que se pensava, a melhor solução seria então, fechar as chaves **C1** e **C2**, e depois fechar o disjuntor **D1**, o que seria somente três manobras.

□ *Exemplo 2 : Proteção contra novas falhas*

Suponha que um operador tenha duas opções possíveis para reenergizar o alimentador **A** (ver figura AC2).

Novamente, se levássemos em conta somente o número de manobras, a melhor solução seria fechar a chave **C1** e depois fechar o disjuntor **DA**. O problema encontrado no exemplo anterior não ocorreria, uma vez que se tem o disjuntor **DA** para interromper a corrente elétrica em **C1**.

Todavia, se uma nova falha ocorrer em **P** (um equipamento qualquer), por exemplo, o resultado vai ser a imediata abertura do disjuntor **D1**. Assim, a corrente será interrompida em toda a subestação, deixando não só o alimentador **A** mas também o **B** sem energia.

Se por outro lado, o operador tivesse escolhido reenergizar **A** fechando as chaves **C2** e **C3** e fechando em seguida os disjuntores **D2** e **DA**, se uma nova falha ocorresse em **P**, o disjuntor que abriria nesse caso, seria o **D2**, poupando assim o alimentador **B** de ficar sem energia.

Mais uma vez, a melhor solução para uma reenergização de emergência não é simplesmente aquela com o menor número de manobras. Diversos outros exemplos poderiam mostrar situações semelhantes às anteriores, mostrando que o SE2 precisa saber estabelecer um compromisso entre os diversos critérios, obedecendo à hierarquia estabelecida.

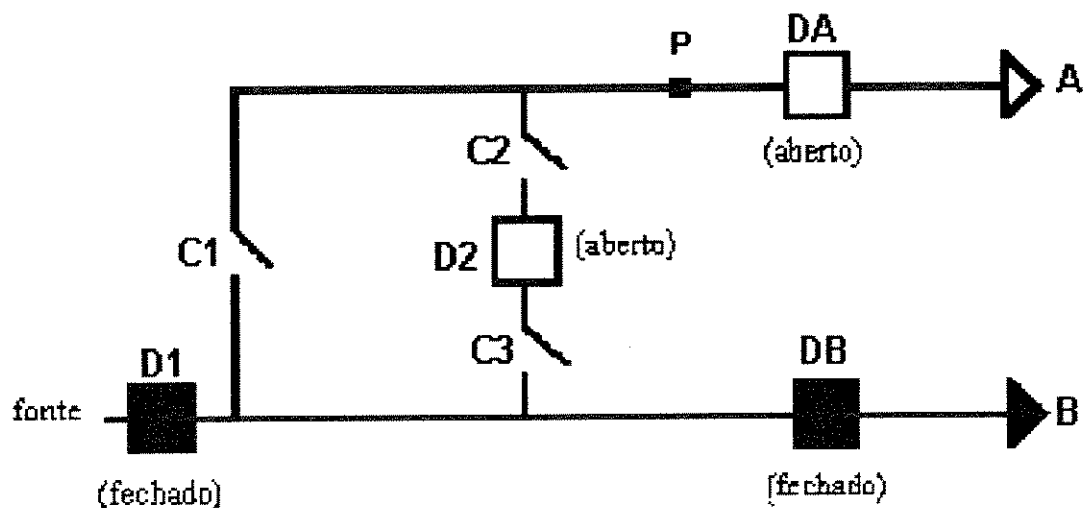


figura AC2

Representação do Conhecimento sobre o Problema de Reenergização de Emergência

O problema de reenergização de emergência foi modelado como um problema da classe de caminho mínimo, aplicado em um grafo especial, no qual será definido o melhor caminho entre a fonte e os alimentadores desenergizados. O método utilizado para resolver esse problema consiste na distribuição correta dos custos nos arcos (que representam as chaves, disjuntores e religadores abertos) e que variam de acordo com o contexto no qual se encontram, e com a aplicação iterativa de um algoritmo de Caminho Mínimo.

Esse método então é aplicado em um novo grafo, que representa uma visão macroscópica da subestação. Nesse grafo, cada nó passa a representar uma ilha da subestação (subgrafo) e os arcos representam todos os elementos dinâmicos abertos que possam ser fechados para formar um caminho de reenergização entre a ilha principal, que está energizada, e as ilhas que

contêm alimentadores desenergizados. Foram excluídos dessa nova estrutura as ilhas defeituosas e as ilhas em manutenção. Para efeito de clareza, esse novo grafo será chamado de "*Grafo Reduzido*". A estrutura de dados escolhida para representação do grafo foi uma *lista de adjacências* [Hor] e o algoritmo de *Dijkstra*[Jen] foi implementado para trabalhar com essa lista (ver figura AC3).

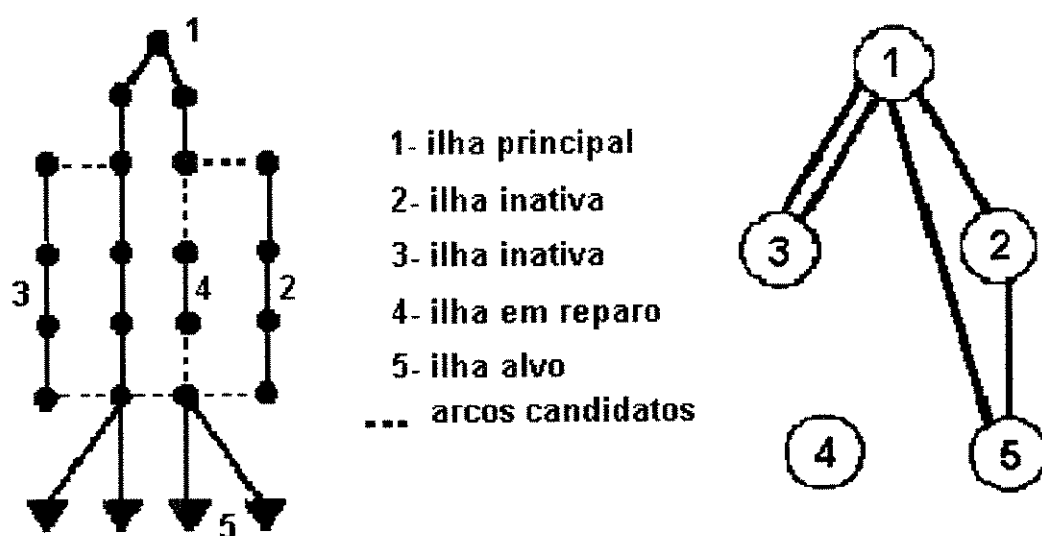


figura AC3

A Distribuição dos Custos nos Arcos

Cada arco, que representa um componente dinâmico aberto, tem um custo denominado *custo básico*, que depende do tipo do componente que representa. Dependendo da situação, ou de onde esse componente se encontra, esse *custo básico* é acrescido ou decrescido de um determinado valor denominado de *custo adicional*.

Os custos básicos são atribuídos de forma a diferenciar os vários tipos de componentes dinâmicos, fazendo que o algoritmo possa privilegiar uns e penalizar outros. Por exemplo: um arco/disjuntor tem um custo bem menor do

que de um arco/chave. Isso tenta promover o uso de disjuntores em vez de chaves para aumentar a segurança.

Os custos adicionais são utilizados para se alcançar os seguintes objetivos:

- ☐ Diferenciar ou privilegiar arcos que representam componentes que são *normalmente fechados*, mas que no momento da falha estavam ou foram abertos, dos que representam os componentes *normalmente abertos*. Isso faz com que as manobras de reenergização sejam feitas, deixando a subestação o mais próximo possível de sua configuração normal de operação.
- ☐ Em caso de haver soluções de mesmo custo, dar preferência a uma que represente um caminho cujos nós contenham maior número de disjuntores. Isso aumenta a segurança adicional contra novas falhas. No exemplo mostrado na figura AC4, há duas soluções possíveis para reenergizar o alimentador A (estando a ilha que contém o nó N isolada), ambas de mesmo custo: fechando C1 e C2 ou fechando C1 e C3. Diminuindo-se o custo de C2, teremos uma solução que conterá o disjuntor D1, o que aumenta a segurança contra novas falhas.
- ☐ Fazer com que componentes dinâmicos seccionadores de barramento sejam usados somente em último caso, procurando não desbalancear a carga nos transformadores. Na figura AC5, mostrada a seguir, há duas soluções possíveis para reenergizar o alimentador A (estando a ilha que contém o nó N isolada), ambas de mesmo custo: uma delas é fechando C2 e C3, outra é fechando C1 e C2. A última opção faz com que A fique alimentado por T2, sobrecarregando-o, ficando T1 livre. Somando-se ao custo de C1 um custo adicional, faz-se com que a solução escolhida seja fechar C2 e C3.

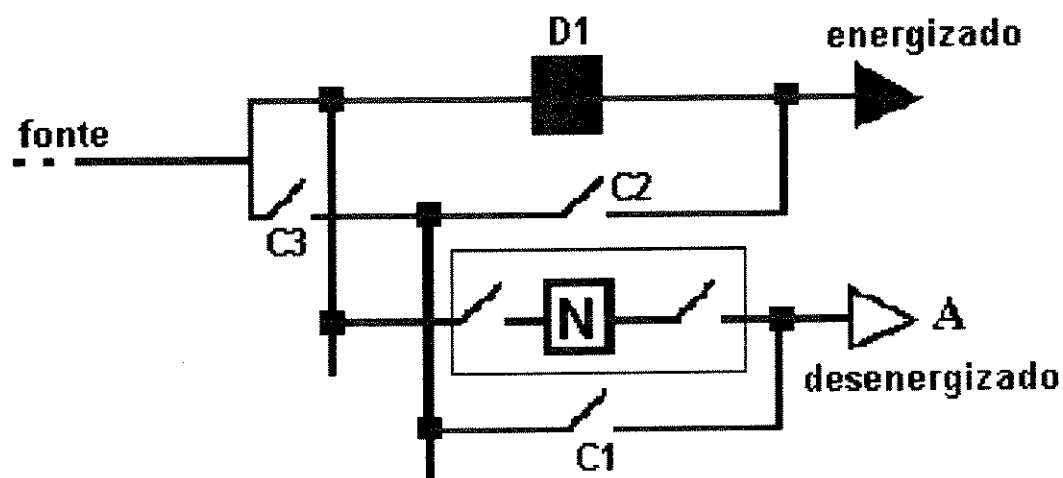


figura AC4

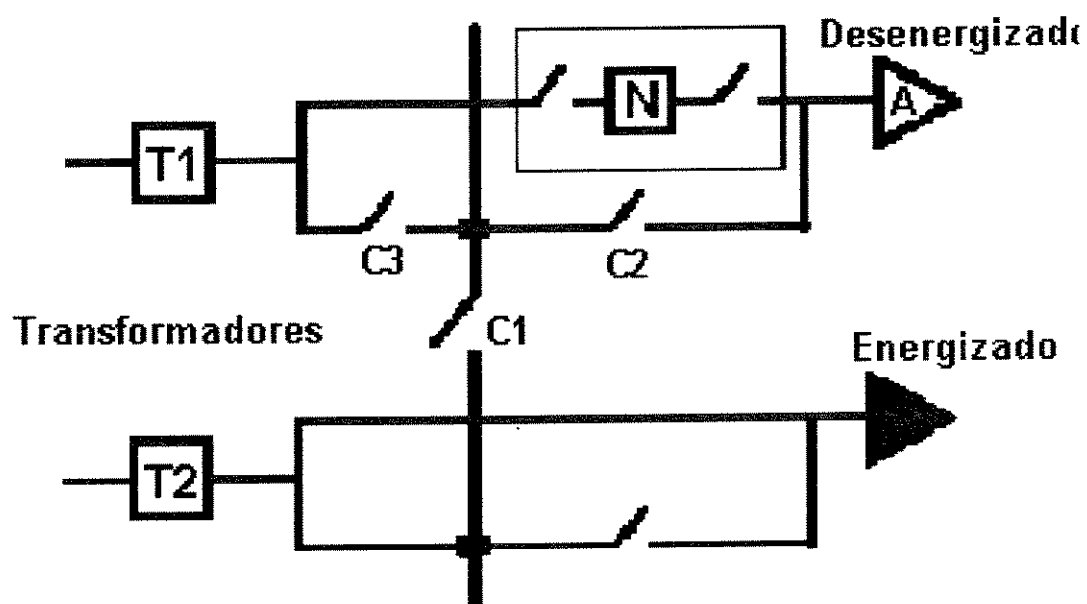


figura AC5

- Evitar soluções que causem sobrecarga: se uma solução encontrada causa sobrecarga em algum componente da subestação, ela então deve ser descartada e uma nova solução deve ser definida. (ver figura AC6).

Na figura AC6, suponha que tenha havido uma contingência dupla nos equipamentos **N1** e **N2** com a abertura dos respectivos disjuntores **D1** e **D2**. Há dois caminhos possíveis para reenergizar **S1** e **S2**. O primeiro fechando as chaves **C4**, **C1** e **C2** e outro fechando **C3**, **C1** e **C2**. Com a distribuição correta dos custos nos arcos **C1**, **C2**, **C3** e **C4**, devido ao fato do caminho utilizando **C3** ter um número maior de disjuntores (maior proteção), ele terá um custo menor que o do caminho que utiliza **C4** e assim ele será o escolhido pelo sistema. Porém, suponhamos que o disjuntor **D3** tenha sua restrição de capacidade violada, uma vez que ele suportará fluxo de três alimentadores atuando como proteção de todos eles.

O sistema então, detectando essa violação na restrição de **D3**, se encarregará de excluir essa solução assim como evitar que novas soluções utilizem **D3**. Ele consegue isso retirando do *Grafo Reduzido* os arcos próximos ao ponto de sobrecarga. Na verdade, ele vai excluir alguns arcos que conectam o nó (ilha) que contém **D3** do resto do grafo. Nesse exemplo então, a chave **C3** é excluída e o sistema encontrará uma nova solução, no caso **C4**, **C1** e **C2**.

Quando a exclusão de arcos (devido ao problema de sobrecarga descrito anteriormente) desconecta totalmente um nó (ilha) alvo do Grafo Reduzido, não deixando solução alternativa para a reenergização de um ou mais alimentadores, significa que todos os possíveis caminhos causam sobrecarga em algum componente. Dessa forma haverá a necessidade de excluir um ou mais alimentadores, deixando-os permanentemente sem energia, para que outros possam ser reenergizados sem causar sobrecarga.

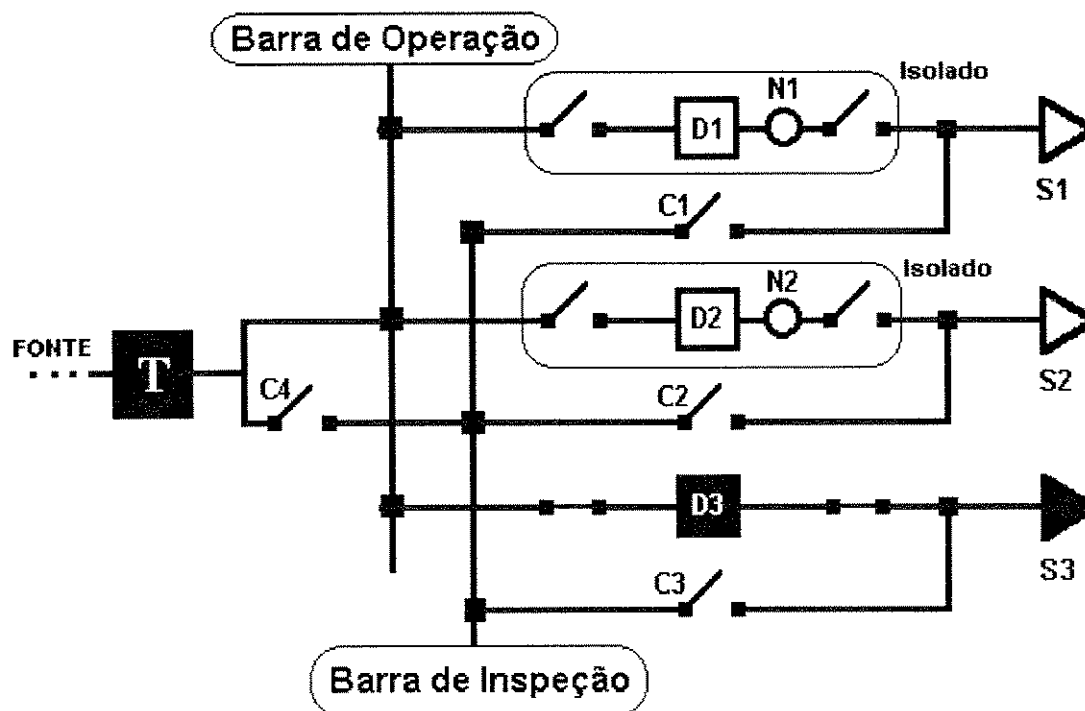


figura AC6

A exclusão obedece uma ordem de prioridade. O usuário pode previamente definir quais alimentadores são mais importantes. Por exemplo aqueles que fornecem energia a áreas onde se situam hospitais, escolas ou outro tipo de consumidor especial, preservando-os de uma eventual necessidade de exclusão em detrimento a outros menos prioritários.

Essa heurística também permite a partição de uma ilha Alvo (que contenha mais de um alimentador), caso sua reenergização cause sobrecarga, permitindo assim que suas "partes" possam ser reenergizadas por caminhos diferentes (figura AC7).

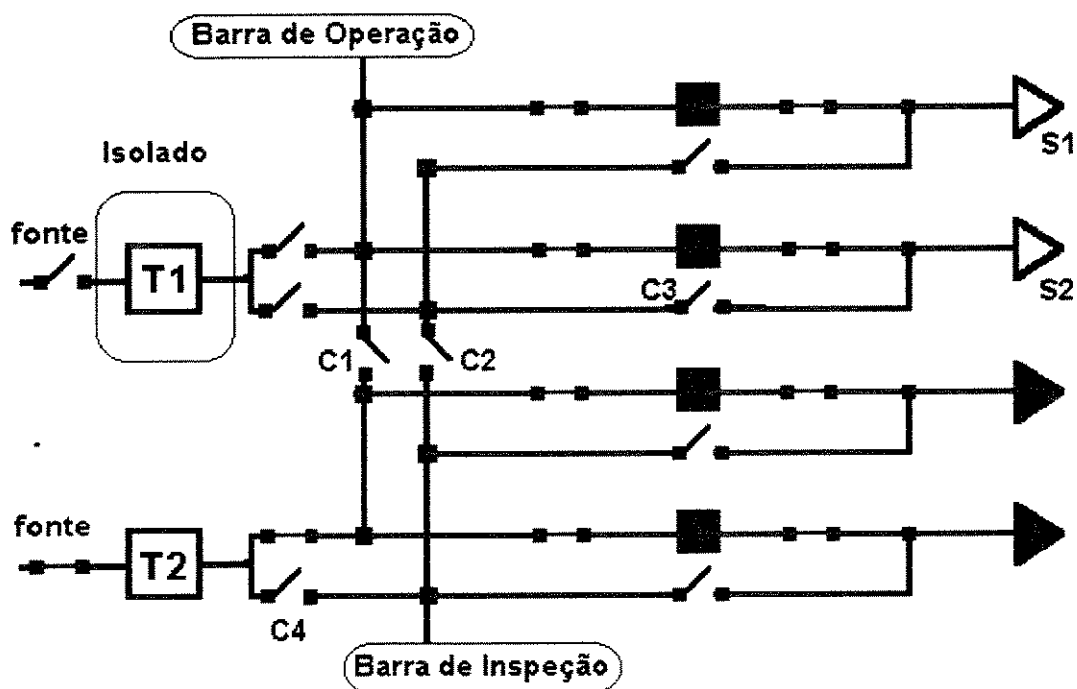


figura AC7

Na figura AC7, suponha que o transformador T1 esteja isolado para reparo após uma falha. Os Alimentadores S1 e S2 estão desenergizados e ambos pertencem à mesma ilha alvo. A forma mais rápida de reenergizá-los é fechando a chave C1, utilizando a barra de operação. Porém, suponha que isso ocorresse em um horário de "pico" de consumo e a barra não suportasse quatro alimentadores, mas apenas três. Haveria então uma violação na restrição de capacidade da barra de operação e um dos alimentadores, necessariamente, deveria ser excluído. Contudo, o sistema após isolar um dos alimentadores (S2 por exemplo), particionando o que antes era uma única ilha "alvo" com dois alimentadores em duas ilhas "alvo", ele busca um novo caminho para reenergizar S2. Esse caminho para S2 é fechando C2, C3 e C4, utilizando a barra de inspeção (figura AC8).

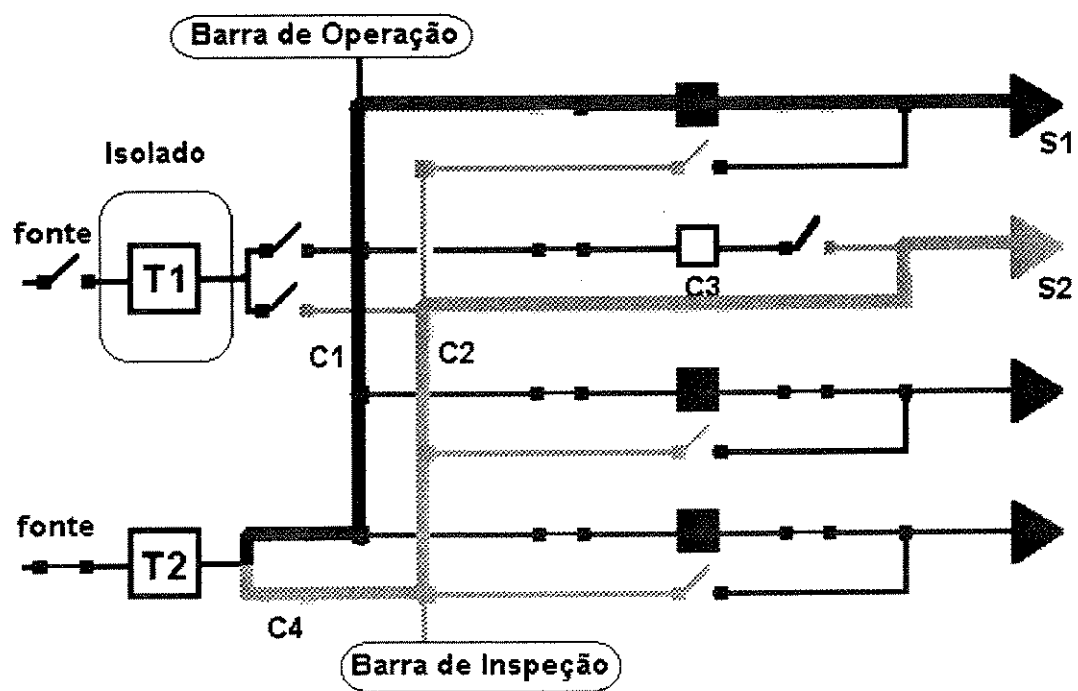


figura AC 8

Primeiros Resultados

Como visto anteriormente, o problema de reenergização de emergência foi modelado como um problema de caminho mínimo. A solução era conseguida pela simples aplicação do algoritmo de *Dijkstra* [Jen] em um grafo cujos arcos tinham seus custos distribuídos de forma que o objetivo fosse alcançado, atentando para fatores como segurança e proteção contra novas falhas.

Na maioria dos arranjos de subestações em que o método foi aplicado, obteve-se sucesso e as manobras sugeridas pelo SE2 foram aprovadas pelo especialista.

Contudo, mais tarde, deparou-se com um problema que obrigou a reformulação do método até então utilizado.

Na subestação de *Tanquinho*, pertencente à CPFL deparou-se com o seguinte problema (figura AC9):

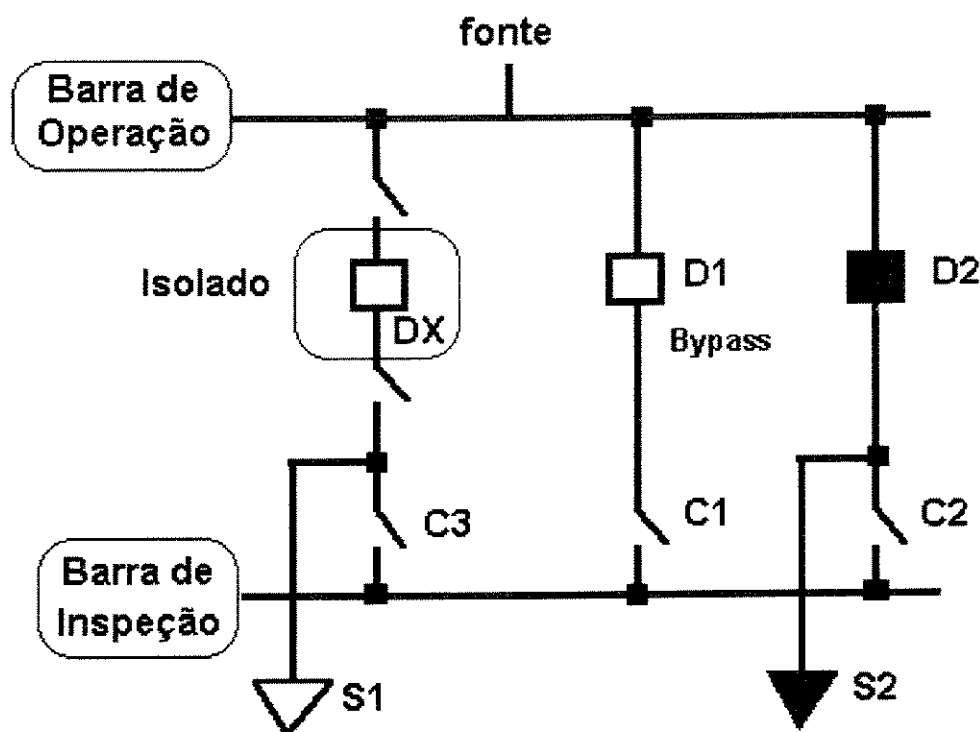


figura AC9: Subestação de Tanquinho

Na, figura AC9, as chaves **C1**, **C2** e **C3**, são chaves "secas", normalmente abertas. Dessa forma , todas elas possuem o mesmo custo. O disjuntor **DX** sofreu uma falha e está isolado, estando **S1** desenergizado (alvo). O grafo para o problema de caminho mínimo assume a forma mostrada na figura AC10.

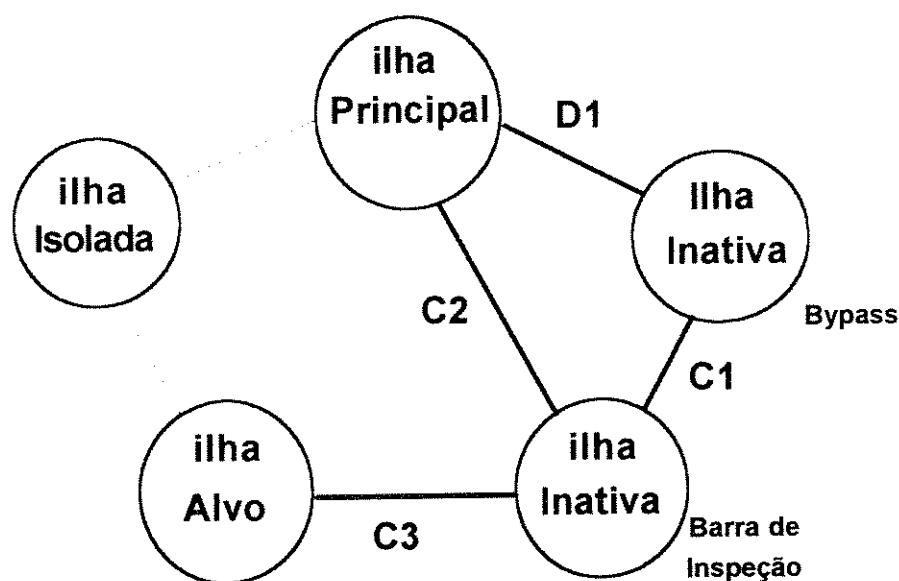


figura AC10: Tanquinho (GRAFO REDUZIDO)

Há duas maneiras possíveis de reenergizar **S1** (na figura AC9). A primeira é utilizando as chaves **C2** e **C3**. A segunda é utilizando as chaves **C1** e **C3** e o disjuntor **D1** (**C1** e **D1** representam o "bypass"). O custo da segunda opção é maior do que a da primeira, uma vez que ele possui um disjuntor (**D1**) a mais. Sendo assim, o caminho mínimo entre a Ilha Principal e a Ilha Alvo, seria fechando as chaves **C2** e **C3**. Como são chaves secas, para que essa operação seja concluída , é preciso abrir o disjuntor **D2**, pelo motivo de não se poder fechar uma chave seca sobre uma carga, como explicado anteriormente. O número de manobras então, é maior do que inicialmente se imaginava.

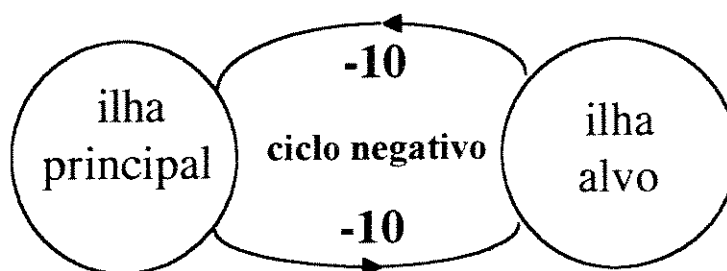
Além disso, Tanquinho é uma subestação de transmissão, e de acordo com o especialista, não se pode colocar mais de uma saída (linha de transmissão), sobre a proteção de um mesmo disjuntor. A solução dada pelo

SE2 fazia com que S1 e S2 ficassem "penduradas" no disjuntor D2. Dessa forma a solução é infactível. Essa regra não se aplica a subestações de distribuição. O correto seria utilizar o "bypass", uma vez que ele foi projetado e construído justamente para esse tipo de operação. O disjuntor do "bypass" (D1) é que deveria fazer a "proteção" contra possíveis falhas que possam ocorrer em S1. Essa proteção era feita por DX.

Para resolver esse problema, pensou-se primeiramente em atribuir pesos negativos aos disjuntores e religadores. No exemplo acima, o disjuntor D1 teria peso convenientemente negativo para que a solução passasse pelo "bypass". Como o algoritmo de Dijkstra não trabalha com arcos de custo negativo, um novo algoritmo foi utilizado. O algoritmo implementado foi uma simplificação do algoritmo de *Bellman* [Min] que detecta ciclo negativo.

Essa nova metodologia mostrou-se ineficaz. Na maioria dos arranjos de subestações testados, houve formação de ciclos negativos, o que fez com que o algoritmo não chegasse a uma solução final limitada. O próprio *Grafo Reduzido* contribui para a formação de ciclos. Para se representar arcos *não* *direcionados*, são utilizados dois arcos (um de "ida" e outro de "volta").

representação de arcos não direcionados : Disjuntor



Dessa forma foi necessário alterar o algoritmo original para que ele desconsiderasse o arco de "retorno", evitando assim que a formação desses ciclos "intrínsecos".

Todavia, isso não resolveu o problema dos ciclos negativos, uma vez que havia a possibilidade, como ocorreu realmente em vários testes, de ocorrer ciclos negativos maiores, por exemplo, quando havia mais de um disjuntor ou religador aberto (figura AC11).

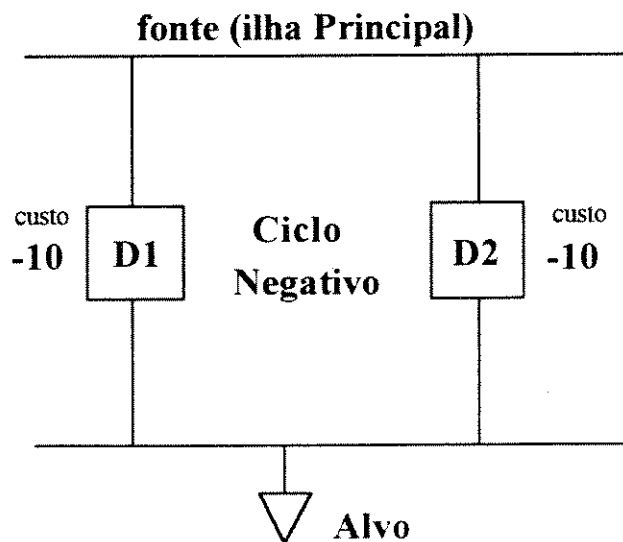


figura AC11

Portanto, a metodologia de se alocar custos negativos aos arcos que representavam disjuntores e religadores, como uma maneira de se contornar o problema encontrado no teste com a subestação de Tanquinho, se tornou ineficaz tendo que ser descartada.

A solução para esse problema veio através da observação dos resultados conseguidos até então, com a aplicação do algoritmo de *Dijkstra*, no problema de reenergização de emergência em subestações de distribuição, cujos resultados foram aprovados pelo especialista. Na grande maioria das soluções encontradas, havia a presença de pelo menos um disjuntor ou religador no conjunto de elementos dinâmicos que deveriam ser fechados para completar a reenergização. Nas soluções que não continham disjuntor ou religador, notou-se que não havia algum passível de ser utilizado na operação (estava isolado, ou não fazia parte de algum caminho entre as ilhas Alvo e a ilha Principal).

Tomando o exemplo de Tanquinho, a solução encontrada pelo SE2 é infactível, e não contém disjuntores (o conjunto solução é composto pelas

chaves **C2** e **C3**). Porém, se deixarmos de lado a solução do SE2 e tomarmos a solução do especialista, temos a presença de um disjuntor (o conjunto solução do especialista é composto por **C1**, **C3** e **D1**). Dessa forma, pode-se concluir que, se existir um ou mais disjuntores ou religadores (abertos), que façam parte de "caminhos" entre a Ilha Principal e as Ilhas Alvo, o conjunto solução sempre conterá algum(s) desses disjuntores ou religadores.

Partindo dessa observação, resolveu-se então que o objetivo principal, que era encontrar um caminho entre a ilha Principal e as ilhas Alvo, poderia ser particionado em dois sub-objetivos. Esses dois sub-objetivos, também poderiam ser alcançados com a aplicação do algoritmo de *Dijkstra* para o problema de caminho mínimo.

Novamente, deve ser lembrado que esse método é aplicado sobre o *Grafo Reduzido* cujos nós representam as ilhas da subestação. Doravante, a palavra "ilha" será substituída pela palavra "nó" que melhor se adapta ao contexto de grafos. O primeiro sub-objetivo então, é determinar o caminho mínimo entre o nó Principal e todas os outros nós da subestação (excluindo-se os isolados). Tem-se, então, a árvore de caminho mínimo enraizada no nó Principal (ilha Principal).

Notar que se houver algum disjuntor ou religador no conjunto de arcos do caminho mínimo entre um nó Alvo **S** e o nó Principal, então essa é a solução ótima para reenergizar **S**. Dessa forma, não há necessidade de se buscar o segundo sub-objetivo, uma vez que o objetivo principal já foi alcançado.

Se, ao contrário, não existir um único disjuntor ou religador na solução, armazena-se a árvore de caminho mínimo enraizada no nó Principal, e inicia-se a busca pelo segundo sub-objetivo, que é para cada nó Alvo **S_i** do *Grafo Reduzido*, encontrar o caminho mínimo desse nó para todas os outros, excluindo os nós Isolados e o nó Principal. Dessa forma, tem-se para cada nó Alvo uma árvore de caminho mínimo enraizada nele.

A solução final para uma determinada ilha Alvo **S_i** é obtida da seguinte forma. Para cada nó **D_j** {**j**= 1...**n**}, que é nó origem de um arco do tipo

disjuntor ou religador, calcular a soma dos caminhos entre S_i e D_j , obtida da árvore de caminho mínimo enraizada em S_i , e entre D_j ao nó Principal, obtido na árvore de caminho mínimo enraizada no nó Principal. A solução ótima para reenergizar o nó Alvo S_i é aquela que para um determinado nó D_j , os caminhos S_i a D_j e D_j ao nó Principal sejam arco-disjuntos e cuja soma dos respectivos "comprimentos" seja mínima. Caso não exista nó D_j cujos caminhos são arco-disjuntos, a solução volta a ser aquela obtida no primeiro sub-objetivo, ou seja, o caminho mínimo direto entre S_i e o nó Principal.

Para exemplificar tomemos o *Grafo Reduzido* da figura AC12 a seguir, onde os nós representam as ilhas de uma subestação que não está em seu estado normal de operação devido a alguma ocorrência. Os nós **D1** e **D2** são os nós origem de arcos disjuntores (representados na figura por **d1** e **d2**). Os nós isolados para manutenção ou reparo não estão representados. O nó **P** representa a ilha Principal e o nó **S** a representa a ilha Alvo.

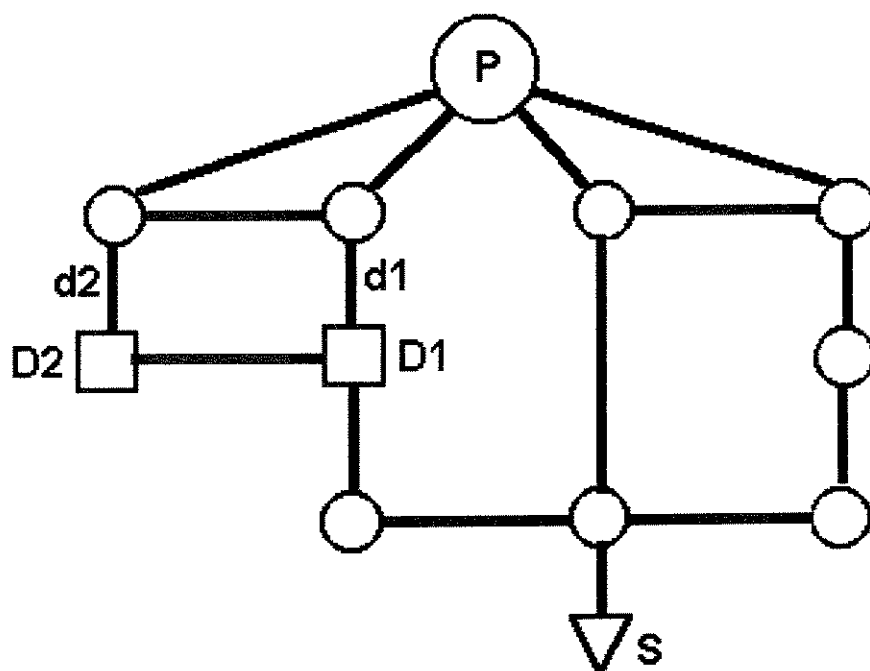


figura AC12: Grafo Reduzido

O primeiro sub-objetivo é alcançado utilizando o algoritmo de *Dijkstra* para determinar o caminho mínimo entre o nó Principal **P** e todos os demais nós do *Grafo Reduzido*. Para facilitar vamos considerar que todos os arcos têm o mesmo custo, inclusive os disjuntores **d1** e **d2**. A figura AC13 mostra como será a árvore de caminho mínimo enraizada em **P**.

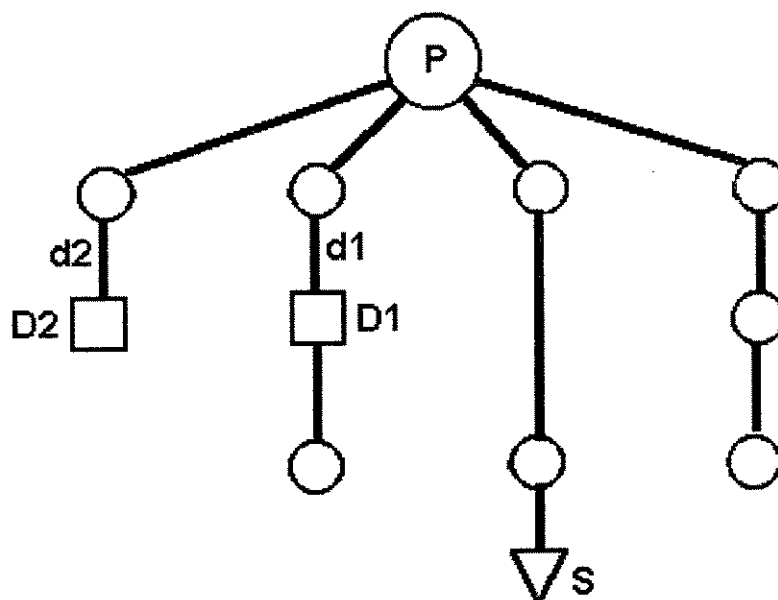


figura AC13: árvore de caminho mínimo enraizada em P

Pode-se notar na figura AC13, que o caminho mínimo entre o nó **S** até o nó **P** não contém disjuntor ou religador. Assim, inicia-se a "fase 2", buscando o sub-objetivo número dois. Novamente aplica-se o algoritmo de *Dijkstra*, para determinar agora, o caminho mínimo entre o nó Alvo **S** e todos os outros nós, excluindo-se o nó Principal **P**. Se essa exclusão não ocorrer, pode acontecer de um possível caminho mínimo entre o nó **S** e um nó origem de arco disjuntor (por exemplo **D1**), passe pelo nó **P**. Isso faz com que o "caminho solução" (caminho mínimo de **S** a **D1** mais o caminho mínimo de **D1** a **P**), não seja arco-disjunto o que inviabiliza o resultado (**S** liga-se diretamente a **P** sem a presença de disjuntor). A figura AC14 mostra a árvore de caminho mínimo enraizada no nó **S**.

Como temos somente dois nós (**D1** e **D2**) que são origem de arcos disjuntores, teremos dois possíveis "caminhos" para reenergização de **S**, que

possuem disjuntos. Uma seria utilizando o caminho de **S** até **P**, passando por **D1** (utilizando o arco **d1**). A outra utilizando o caminho de **S** até **P** passando por **D2** (utilizando o arco **d1**). O melhor é aquele cujo custo é menor.

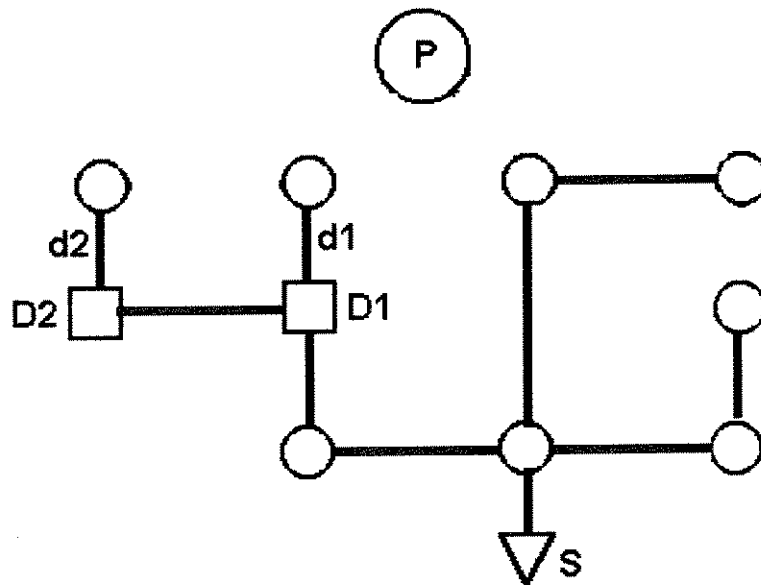


figura AC14: árvore de caminho mínimo enraizada em S

Há a garantia que o caminho de **S** a **D1** e a **D2** são mínimos (obtido pela árvore de caminho mínimo enraizada em **S** - figura AC14) e que os caminhos de **D1** e **D2** até o nó Principal **P** também são mínimos (obtido pela árvore de caminho mínimo enraizada em **P** - figura AC13). Baseado nessas duas árvores de caminho mínimo, pode-se obter o caminho mínimo de **S** até **P** passando por **D1** e também o caminho mínimo de **S** a **P** passando por **D2**. A figura AC15 ilustra esses dois caminhos, onde se pode notar que o que passa por **D1** é o de menor custo (supondo, como dito anteriormente, que todos os arcos possuem o mesmo custo).

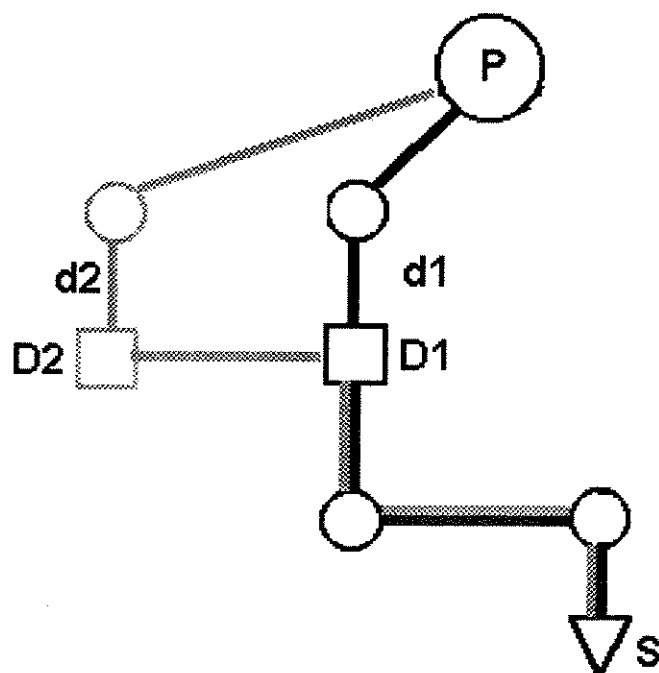


figura AC15: caminhos mínimos de S a P. Um passando por D1 e outro passando por D2

Voltando ao exemplo da subestação de Tanquinho, citado anteriormente (figura AC9), a figura AC16(a,b,c) mostra o resultado da aplicação dessa nova metodologia. O problema da não utilização do "bypass" na reenergização fica solucionado.

Vale ressaltar mais uma vez que na maioria dos casos de reenergização, na solução do caminho mínimo da ilha Principal (nó Principal) a todos os outros nós, e conseqüentemente às ilhas Alvo, já existe algum disjuntor. Dessa forma não há a necessidade de se buscar o segundo sub-objetivo, poupando esforço computacional. Para esses casos a nova metodologia produz o mesmo resultado daquele que era obtido anteriormente pela simples aplicação do algoritmo de *Dijkstra*.

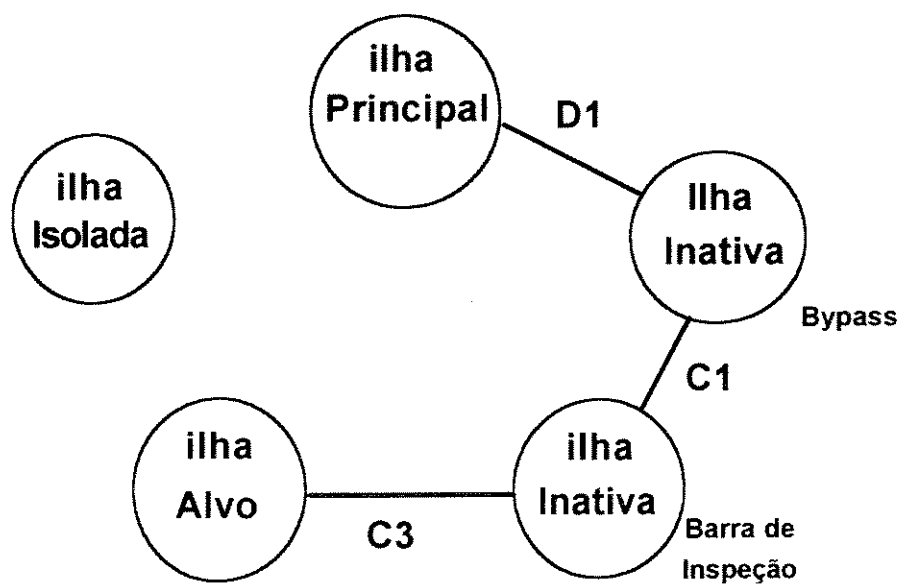


Figura AC16c: Solução ótima final

3.4 - Manutenção

Em uma subestação, a colocação de equipamentos em manutenção deve levar em consideração a continuidade de fornecimento de energia aos alimentadores ou às linhas de transmissão. Isso quer dizer que o operador quando executa manobras para isolamento de equipamentos para manutenção, ele busca uma maneira de evitar o que se chama de "pisca". Vale ressaltar que essa operação já foi melhor discutida e exemplificada anteriormente, assim como o método utilizado para representar a formação de anéis, sem perda de arborescência, utilizando *nós artificiais e falsos arcos*.

Relembrando, quando ocorre uma falha em algum equipamento há a necessidade de isolá-lo para que seja reparado. A seguir há a reenergização, procurando outros "caminhos" para que alimentadores ou linhas de transmissão, que porventura ficaram sem energia devido à falha ocorrida, sejam novamente energizados. Da mesma forma, o equipamento que vai entrar em de manutenção necessita ser isolado e com isso deve-se buscar outros caminhos para reenergizar os alimentadores que com a manobra de isolamento ficariam sem energia.

Novamente aqui, no contexto de manutenção de equipamentos, o operador busca cumprir o objetivo de isolar um equipamento para manutenção obedecendo alguns critérios, assim como acontecia no contexto de reenergização:

- ☐ Procurar manobrar o menor número de elementos dinâmicos (chaves, disjuntores e religadores) possível.
- ☐ Levar em consideração fatores de segurança e de proteção contra falhas.
- ☐ Evitar que a solução encontrada, atendendo os itens anteriores, cause sobrecarga em algum equipamento.

Pode-se notar que essas regras são basicamente as mesmas que devem ser obedecidas para reenergização de emergência. Imagina-se, porém, que se está trabalhando dentro de um ambiente bem mais "calmo", uma vez

que a subestação se encontra em seu estado normal de operação, e dessa forma, as manobras podem ser melhor estudadas e executadas com mais tranquilidade..

O primeiro critério busca restringir a complexidade da manobra a ser realizada. O segundo, como também acontecia no caso de reenergização, procura determinar entre várias possíveis soluções (caminhos) aquela que proporcione uma maior proteção e segurança contra uma possível falha que possa ocorrer durante a manutenção de um equipamento.

Finalmente, o último procura evitar que haja uma sobrecarga em algum componente quando o anel for desfeito para isolar o equipamento que sofrerá manutenção. Todavia, nesse contexto, a ocorrência de uma sobrecarga é um fato difícil de ocorrer, uma vez que a colocação de componentes em manutenção, acontece em datas pré-estabelecidas, com baixo consumo de energia (por exemplo, em um final de semana).

Deve ser ressaltado que as manobras para formação de anel para colocação de equipamentos em manutenção só são necessárias quando o equipamento está energizado e com corrente elétrica. Caso contrário, o equipamento pode ser isolado diretamente, pois isso não afetará os alimentadores ou linhas de transmissão. Da mesma forma, caso o equipamento já faça parte de um ciclo (no caso da subestação operar normalmente em anel), também basta isolá-lo diretamente.

Como ocorria no contexto da reenergização de emergência, o conhecimento do especialista no caso da manutenção de equipamentos pode ser representado como um problema de caminho mínimo, aplicado novamente sobre o *grafo reduzido* representado por uma estrutura de dados chamada de lista de adjacências [Hor].

Os custos básicos dos arcos, que representam os elementos dinâmicos abertos, são os mesmos dos aplicados ao problema de reenergização de emergência. Todavia, o objetivo agora não é mais unir uma ou mais ilhas

alvo à ilha principal, mas sim formar um anel energizado que contenha o equipamento a sofrer manutenção.

Relembrando o que foi descrito em capítulo anterior, para cada "ilha" (sub-árvore) da subestação que está sendo "controlada" pelo Sistema Especialista, foi atribuída uma variável de identificação, chamada de "cor". A Ilha Principal mantinha sempre a mesma cor, enquanto as demais podiam ir trocando de cor à medida que iam se ligando umas às outras ou se desconectando para formar novas ilhas e conseqüentemente novas cores. Todos os nós de uma ilha eram "pintados" com sua cor, facilitando assim a identificação da ilha a que pertenciam assim como a detecção da formação de anéis (fechar uma chave /arco cujos nós são da mesma cor). No contexto de reenergização de emergência, o objetivo era conseguir encontrar uma forma de mudar a cor de uma Ilha Alvo tornando-a da cor da Ilha Principal. Isso se conseguia quando era encontrado um caminho de reenergização e efetuando-se as manobras necessárias, conectando a Ilha Alvo à Principal.

Multicoloração

No grafo reduzido, cada nó representa uma ilha da subestação, sendo identificado então por sua "cor". Essas cores são importantes pois definem para o algoritmo de Dijkstra para o problema de caminho mínimo, quais são os nós que devem ser considerados e em qual nó deve ser "enraizada" a árvore de caminho mínimo. Como para o problema de manutenção busca-se encontrar não o caminho mínimo mas sim o circuito mínimo (ciclo) que contenha o nó Principal (Ilha Principal), para que o algoritmo de Dijkstra pudesse ser utilizado criou-se o conceito de "multicoloração" da Ilha Principal. Essa "multicoloração" consiste em "pintar" temporariamente, parte da ilha Principal de cor distinta da sua original. Dessa forma, a ilha principal pode ser representada por duas cores (dois nós no grafo reduzido), possibilitando a utilização do algoritmo que agora pode enraizar a árvore de caminho mínimo em um dos nós que representa a Ilha Principal, e definindo o caminho mínimo

até o outro nó, formando assim o anel. É importante ressaltar que o conceito de multicoloração só existe dentro do contexto de manutenção.

A princípio pensou-se em utilizar duas cores , ou seja a ilha Principal teria duas cores distintas sendo que parte de seus nós (agora falando do grafo representativo, e não do reduzido) seriam "pintados" de uma das cores e outra parte com a segunda cor. A forma como essas cores são divididas pela sub-árvore (ilha) pode ser vista na **figura (MN1)**. As duas cores dividem a ilha em dois conjuntos de nós. Um dos conjuntos mantém a cor original e o outro recebe uma cor distinta e é composto por todos os nós da ilha que são "descendentes" do nó a ser colocado em manutenção, situados "abaixo" dos arcos que representam os componentes dinâmicos fechados mais próximos e que serão abertos para o isolamento do equipamento.

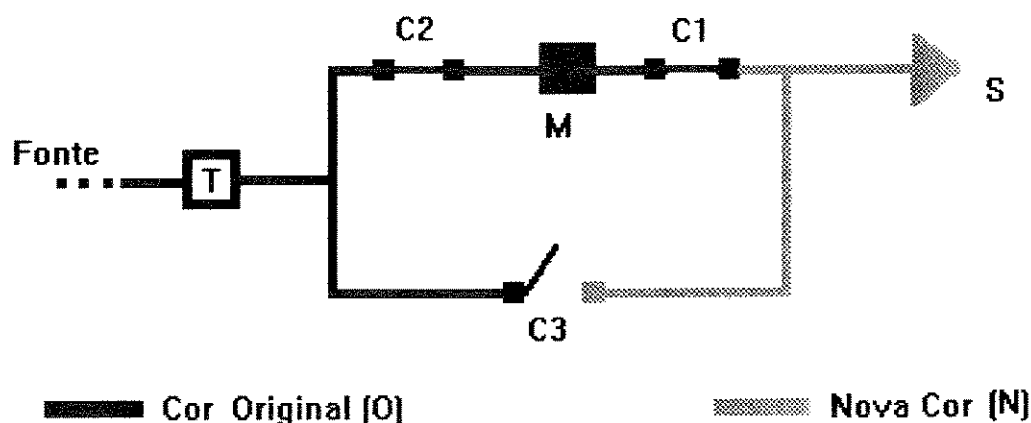
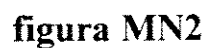


figura MN1

Na figura **MN1** tem-se o equipamento **M** que deve ser colocado em manutenção. Com a multicoloração, podem ser bem definidos os dois conjuntos de nós, que a princípio pertencem à mesma ilha (a Principal, logo energizados), mas que no *grafo reduzido* pertencerão a nós distintos (lembrando que um nó neste grafo representa uma ilha da subestação). É como se a ilha principal tivesse sido dividida em duas outras, porém logicamente e não fisicamente.

No decorrer do trabalho, notou-se que o uso de duas cores no processo de multicoloração, em alguns casos estudados e testados no SE2, não produzia o resultado esperado. Na figura MN2 é ilustrado um destes casos.



Um outro exemplo em que o uso de duas cores não produz o resultado esperado pode ser ilustrado pela figura MN3.

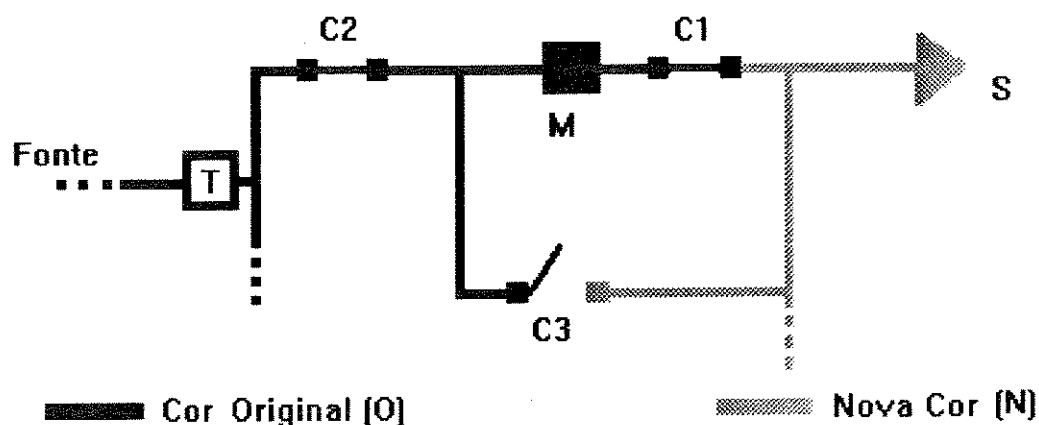


figura MN3

Novamente, o equipamento **M** deve ser colocado em manutenção. A solução para o caminho mínimo entre os dois nós do grafo reduzido (nó de cor **O** e o de cor **N**) é pelo arco **C3**, porém embora o anel formado contenha equipamento **M**, a chave **C3** faz parte do conjunto de arcos que devem ser abertos para o isolamento de **M**, o que inviabiliza a solução.

Esses problemas puderam ser superados com o uso de três cores distintas no processo de multicoloração da Ilha Principal. Além das duas cores utilizadas até então, foi introduzida mais uma cor. Dessa forma a Ilha Principal fica dividida não mais em dois, mas sim em três conjuntos distintos de nós.

Dois destes conjuntos continuam a ser formados como anteriormente. O terceiro conjunto, representado pela nova cor, contém os nós da Ilha Principal que ficarão isolados após as manobras para o isolamento do equipamento que deve ser colocado em manutenção. Essa nova cor representa então um novo nó do grafo reduzido e não pode fazer parte de qualquer solução de caminho mínimo entre os outros dois nós (representado pelas outras duas cores). As figuras **MN4** e **MN5** ilustram a multicoloração da Ilha Principal pelo método das três cores, aplicado aos exemplos das figuras **MN2** e **MN3** respectivamente.

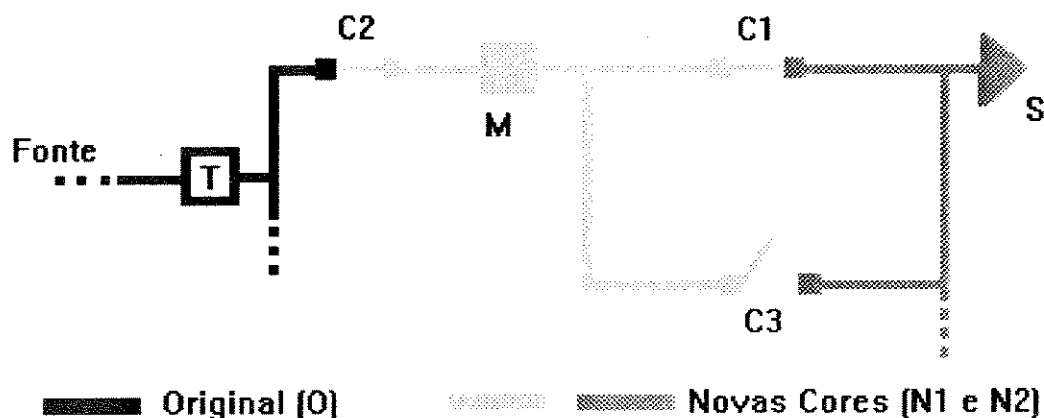


figura MN4

Na figura MN4, o equipamento **M** deve ser colocado em manutenção. Pode-se notar a separação da Ilha Principal em seus três conjuntos de nós. O conjunto que contém **M** não é considerado na formação do grafo reduzido, assim, exclui-se qualquer possibilidade dele ser utilizado na formação do caminho mínimo(entre os dois nós do grafo reduzido que representam os outros dois conjuntos da Ilha Principal). No exemplo ilustrado pela figura **MN4**, a solução encontrada pelo SE2 é utilizando outros arcos (chaves e disjuntores) e não mais a chave **C3** como ocorria anteriormente. Dessa forma garante-se que o anel a ser formado sempre conterá o equipamento **M**.

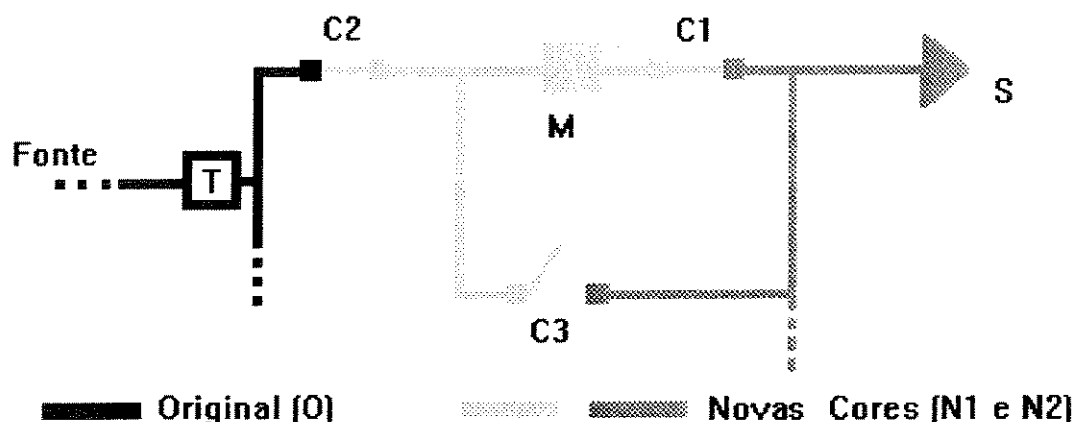


figura MN5

Na figura **MN5**, como no exemplo anterior, a multicoloração garante que a chave **C3** não será utilizada, uma vez que o conjunto de nós que contém **M** não é considerado na formação do grafo reduzido. Fica garantido que a solução encontrada não utiliza arcos (chaves e disjuntores) que posteriormente precisem ser abertos para o isolamento total de **M**.

Pode-se notar que existe uma semelhança muito grande nas abordagens para os problemas de reenergização e de manutenção. Na reenergização existe uma ilha isolada para reparo (Ilha Defeituosa) e busca-se um caminho entre uma Ilha Alvo e a Ilha Principal. Esse caminho, como visto anteriormente, deve ser o melhor possível obedecendo algumas condições e restrições. Na manutenção ocorre a mesma coisa. A diferença é que no caso da manutenção, as ilhas Alvo e Defeituosa não são "explicitamente" definidas. A multicoloração tem o objetivo então, de definir quais e como serão essas ilhas antes delas se formarem. Na reenergização tem-se a presença "física" dessas ilhas enquanto no problema de manutenção há uma presença "lógica".

A ilha **ALVO** lógica existe porque o elemento a ser isolado, no caso para manutenção, possui corrente elétrica (caso contrário não precisaria formar anel) o que significa que há alimentadores ou linhas de transmissão que estão sendo energizados através dele.

A diferença entre os dois problemas é temporal. Enquanto na reenergização de emergência busca-se um caminho entre ilhas Alvo e a Principal, depois que a ilha Defeituosa (isolada para reparo) se formou, na manutenção busca-se um caminho de reenergização antes que a ilha a ser isolada se forme (ilha em Manutenção) e conseqüentemente, antes mesmo da formação das ilhas Alvo. Com a multicoloração permite-se a formação de um novo caminho de reenergização, formando o anel, evitando que com o isolamento do componente a ser colocado em manutenção (formação da ilha em Manutenção), haja a formação física de ilhas Alvo, não permitindo a ocorrência do "pisca".

4- Resultados

O objetivo deste capítulo 4 é mostrar os resultados de alguns testes realizados com o SE2. Os arranjos testados foram de algumas subestações de distribuição da CPFL. Foram testados também três possíveis arranjos da subestação Tanquinho, que se destaca por ser uma subestação de **transmissão**.

Embora o estudo de confiabilidade seja uma das primeiras aplicações do SE2 na CPFL, neste capítulo não haverá a exposição dos resultados clássicos referentes a esse estudo particularmente. A intenção é mostrar o comportamento do SE2 frente a eventos comuns nos arranjos de subestações que tomamos para testes.

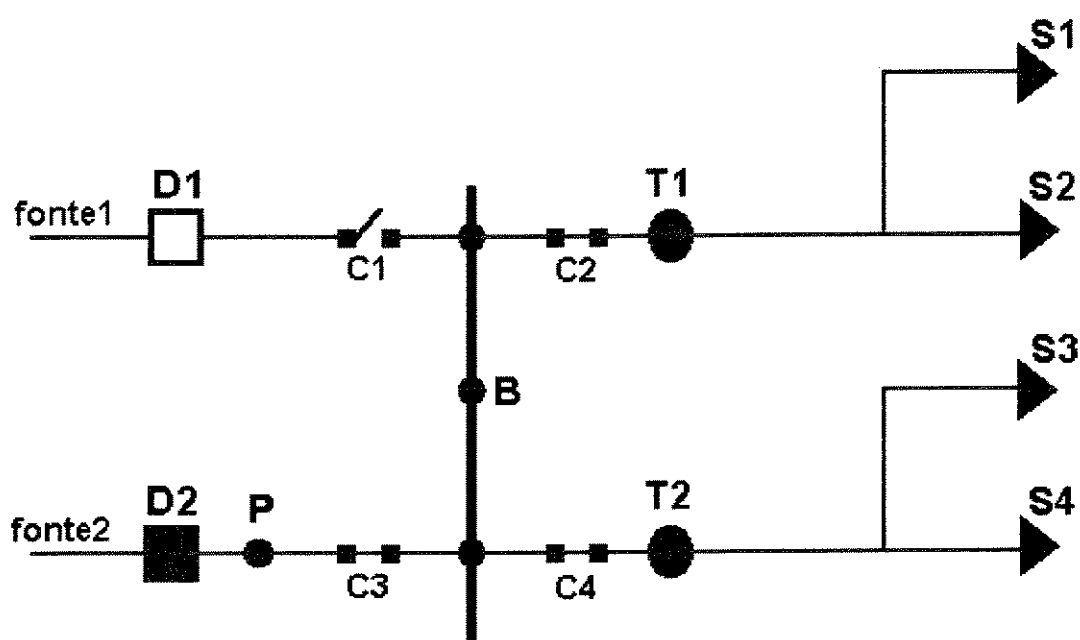
O tema confiabilidade será abordado indiretamente, não em forma de resultados numéricos mas sim de forma intuitiva. Serão mostrados três arranjos ligeiramente distintos da subestação Tanquinho, e o SE2 usará seu "conhecimento" para tratar determinados eventos que serão simulados em cada um desses três arranjos. Com isso, serão mostradas as diferenças entre cada um deles, em relação à proteção contra falhas e a quantidade de energia não suprida, o que, de uma maneira indireta, reflete a confiabilidade de cada um.

Neste capítulo será feita a exposição de alguns eventos específicos, considerados importantes para cada arranjo a ser testado, e as ações e conclusões do SE2. Infelizmente, há dificuldades de apresentar esses resultados, uma vez que não se pode dispor aqui, dos preciosos recursos da interface gráfica, principalmente quando tentamos descrever o processo de inferência feita pelo SE2.

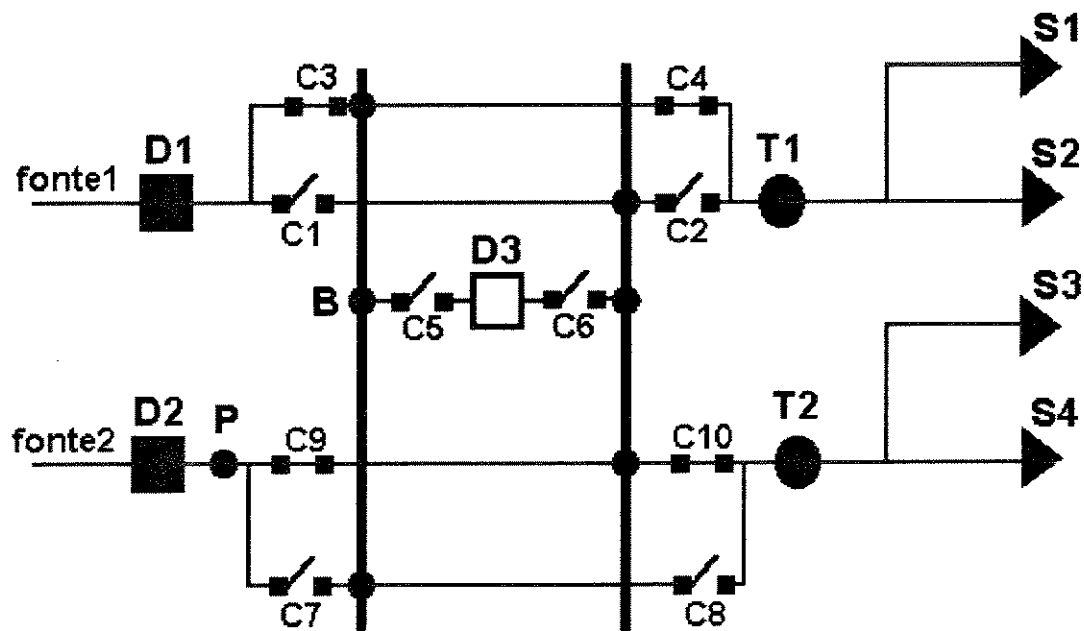
A intenção aqui, como exposto no início deste capítulo, é dar uma noção intuitiva sobre o aspecto de confiabilidade referente a cada arranjo. Os eventos que ocorrerão, serão tratados pelo SE2, e as ações tomadas por ele serão descritas de forma que se possa acompanhar, embora de maneira superficial, o processo de inferência.

É importante ressaltar que os testes realizados e descritos neste capítulo foram acompanhados pelo especialista, e as ações tomadas pelo SE2 corresponderam às expectativas, refletindo o conhecimento do verdadeiro expert.

1^o Exemplo:



SUB1 : Barra Simples



SUB2 : Barra Dupla

Nesse exemplo, os arranjos a serem testados são os apresentados nas figuras **SUB1** e **SUB2**. Esses arranjos são mostrados de forma integral no Apêndice1 deste trabalho. Pode-se notar que as diferenças entre os dois arranjos são o número de barramentos de "alta" e a maneira em que ambos são conectados às fontes. No caso de **SUB1** (barra simples), a subestação só se conecta em apenas uma das duas fontes, ou *fonte1* ou *fonte2* (nesse exemplo, ela se conecta à *fonte2*, deixando o disjuntor **D1** aberto). Essa configuração de entrada é chamada de **TAP**. Em **SUB2**, devido à existência de dois barramentos, ambas as fontes estão conectadas à subestação, cada uma "alimentando" metade da subestação. Esse último arranjo é mais complexo, e certamente, possui um custo mais elevado que o primeiro. Naturalmente, essa diferença de custo deve trazer alguns "benefícios" em termos de confiabilidade, para o arranjo **SUB2**. São justamente esses "benefícios", que com a ajuda do SE2, se procurou demonstrar nesse exemplo.

O primeiro evento a ocorrer é uma falha em **P** (Um equipamento qualquer). Para o arranjo **SUB1**, esse evento provoca a desenergização de toda a subestação, pois a falha causa a abertura do disjuntor **D2**, desconectando totalmente a subestação das linhas de entrada. Para o arranjo **SUB2**, devido ao

fato de haver dois barramentos, onde cada um é alimentado por uma fonte distinta, e estando os alimentadores igualmente distribuídos entre cada uma dessas barras, a falha causou a desenergização somente de **S3** e **S4**, poupando **S1** e **S2**. Isso já é um ponto de destaque para esse último arranjo, uma vez que somente metade da subestação sofreu alguma consequência devido ao evento ocorrido, o que não acontece com o arranjo SUB1.

O SE2, após isolar **P**, procura reenergizar os alimentadores. Em ambos os arranjos a reenergização só é possível através da *fonte 1*, uma vez que a *fonte 2* está isolada. Em SUB1, o SE2 promove essa reenergização, fechando a chave **C1** e o disjuntor **D1**, e na SUB2 fechando os componentes de interligação de barramento (**C5**, **C6** e **D3**). Observando que, uma outra possibilidade de reenergizar os alimentadores em SUB2 seria simplesmente fechar a chave **C8**, porém, o SE2 escolheu utilizar a primeira opção, devido a presença do disjuntor **D3**. Essa escolha aumenta a proteção contra novas falhas que possam ocorrer.

Para melhor ilustrar esse fato, suponhamos que ocorra um novo evento. Esse evento é uma falha (contingência dupla) em **T2**, durante reparo de **P**. Em SUB1, a falha causa a abertura de **D1**, fazendo que todos os alimentadores fiquem desenergizados novamente. Em SUB2, a falha provoca a abertura de **D3**, impedindo a abertura de **D1**, e mantendo **S1** e **S2** energizados. Nesse caso então, somente **S3** e **S4** ficam temporariamente sem energia. Isso mostra bem a importância do disjuntor de interligação de barramentos **D3**.

Se em SUB2, como explicado anteriormente, a reenergização tivesse sido feita não através de **C5**, **C6** e **D3**, mas sim por **C8**, a falha em **T2** deixaria todos os alimentadores sem energia, uma vez que **D1** abriria para interromper a corrente de curto-circuito em **T2**.

Os fatos acima ilustram que a existência de barra dupla com interligação por disjuntor (SUB2), para os eventos descritos acima, contribui para melhorar o índice de confiabilidade.

Nesse exemplo, os eventos ocorridos causaram interrupção temporária, pois havia meios de se conseguir a reenergização. As interrupções duraram, então, o tempo necessário para o isolamento dos equipamentos com defeito, e o tempo de manobra para conseguir a reenergização.

2º Exemplo:

Ao contrário do exemplo anterior, nesse a falha pode causar interrupção permanente, dependendo do arranjo.

Baseado nos mesmos arranjos (SUB1 e SUB2), suponha uma falha no ponto **B** do barramento. Em SUB1, essa falha causa a abertura do disjuntor **D2** e em SUB2, somente a abertura de **D1**, uma vez que **D2** está conectado ao outro barramento.

Novamente, SUB2 tem somente metade de seus alimentadores desenergizados (**S1** e **S2**), e mesmo assim temporariamente. Após o isolamento de **B**, o SE2 busca uma forma de reenergização. A solução encontrada por ele foi fechar a chave **C2** (essa operação envolve também alguns disjuntores, que por motivos de simplificação, não aparecem na figura).

Para o arranjo SUB1, essa falha teve consequências graves. O evento, além de causar a desenergização de todos os alimentadores, o SE2 conclui que não há meios de reenergizá-los. Dessa forma, a interrupção é permanente e se prolongará até que o barramento seja reparado.

Esse exemplo, também ilustra as vantagens do arranjo SUB2 em relação ao SUB1, para o evento ocorrido.

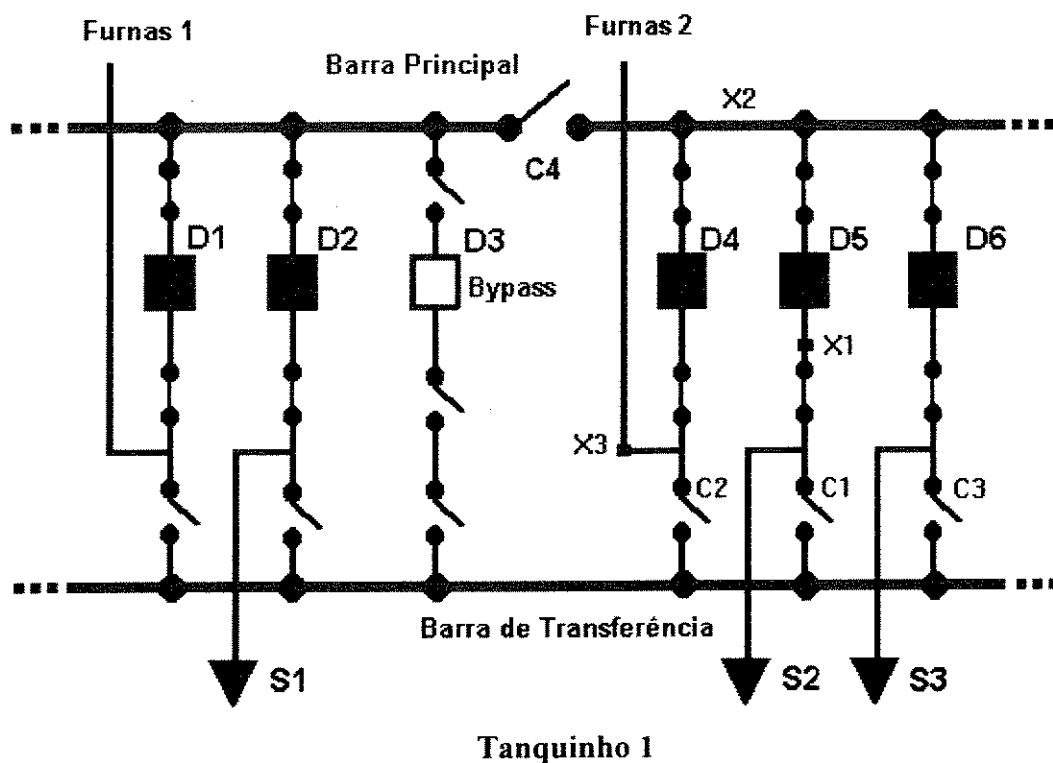
O Exemplo de Tanquinho.

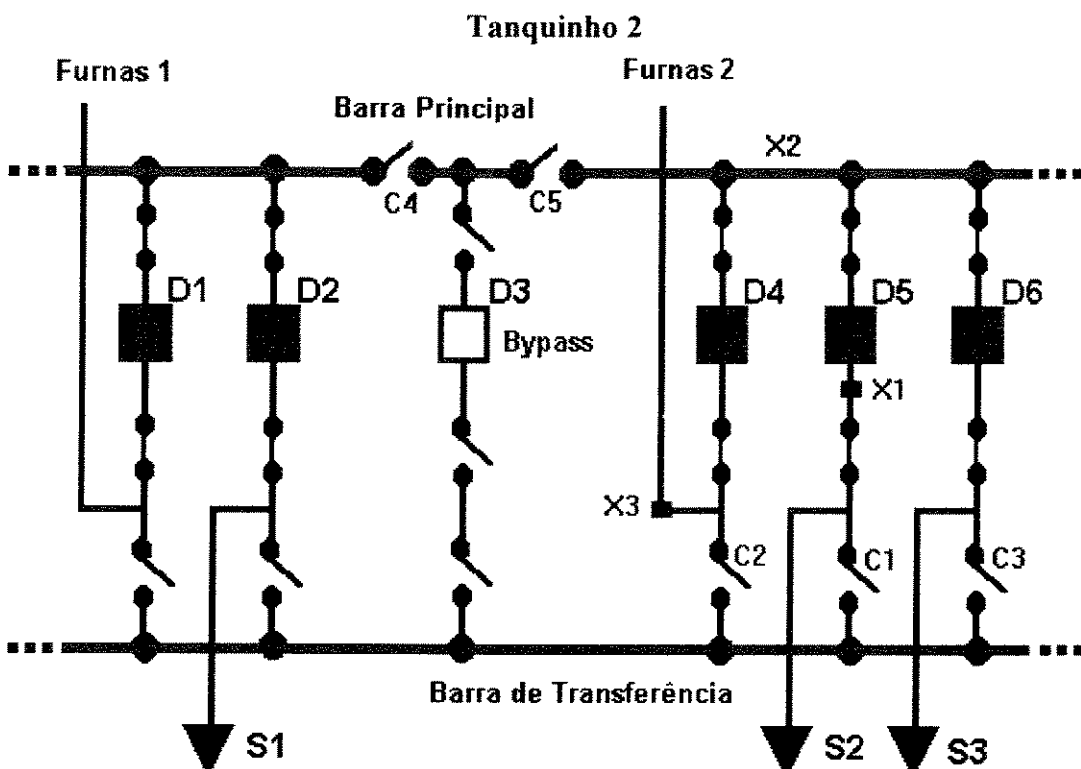
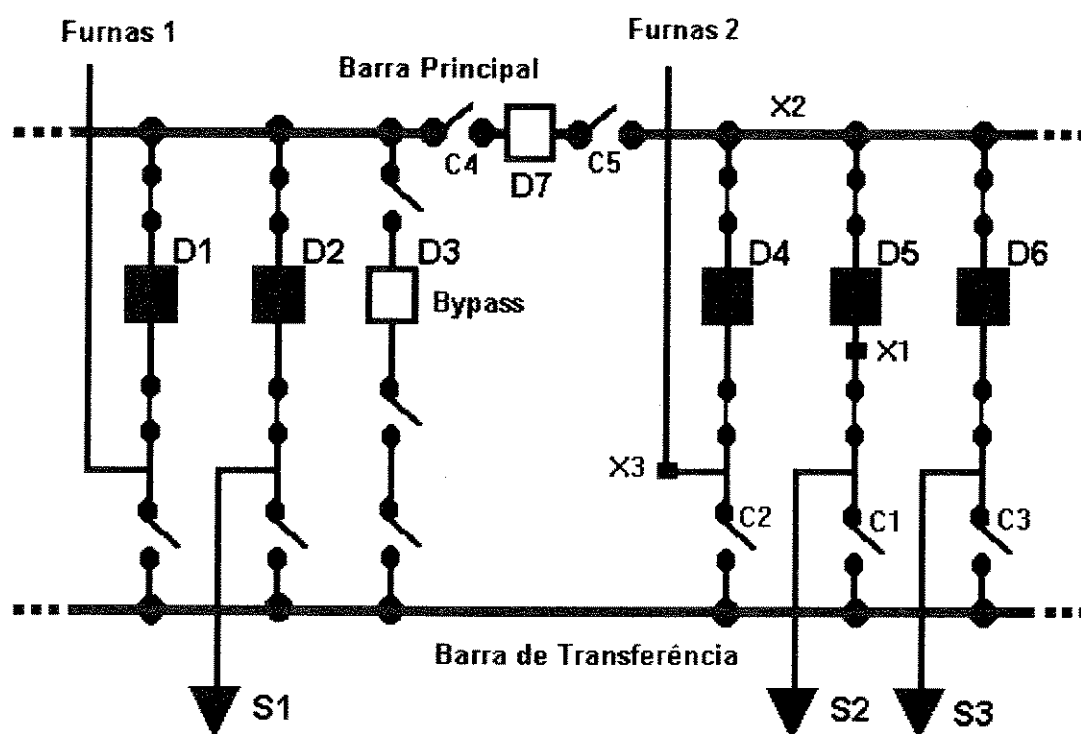
A subestação de Tanquinho será apresentada em três arranjos ligeiramente distintos. Isso faz parte de um estudo real, para um projeto de expansão dessa subestação.

Não será mostrado o estudo de confiabilidade completo, uma vez que isso fugiria um pouco do escopo deste trabalho, mas sim serão ilustrados os principais eventos que definem claramente como as pequenas diferenças entre cada um dos arranjos contribui para aumentar ou diminuir a confiabilidade, sem no entanto, nos atrelarmos a fórmulas ou taxas.

Vale lembrar que, de uma forma geral, os resultados da análise de confiabilidade são contabilizados economicamente, e o arranjo de melhor compromisso entre custo e grau de confiabilidade é escolhido.

A seguir são mostrados os três arranjos possíveis para Tanquinho:





Tanquinho 3

Os três arranjos são mostrados aqui de forma simplificada. Eles são mostrados de forma integral no Apêndice 1 deste trabalho.

As diferenças entre os três arranjos, conforme se pode notar, baseiam-se principalmente na localização do *bypass* e na quantidade de disjuntores em cada um. Os disjuntores são representados nas figuras como um quadrado. O quadrado cheio representa um disjuntor fechado, e o quadrado vazado um disjuntor aberto.

Embora cada arranjo esteja representado de forma simplificada, as figuras ilustram os elementos relevantes, que determinam as diferenças entre cada um. Dessa forma os resultados dos testes sobre esses elementos mostram realmente as vantagens e desvantagens de cada arranjo.

O arranjo Tanquinho 2 se destaca pela presença de um disjuntor seccionando a barra principal, o que não ocorre nos outros dois arranjos. Já Tanquinho 3 se destaca pela localização do *bypass*. As conseqüências dessas ligeiras modificações sobre a confiabilidade de cada arranjo serão mostradas a seguir.

Para melhor ilustrar, foram escolhidos alguns eventos que ocorrerão da mesma forma em todos os três arranjos. O SE2 então irá tratar esses eventos mostrando como essas variações em cada arranjo influenciam a confiabilidade de cada um. Infelizmente é difícil ilustrar cada passo tomado pelo SE2, assim como as variações da topologia em cada arranjo, referentes às ações disparadas por ele. Dessa forma, essas ações serão apenas descritas de uma maneira que se possa acompanhá-las, ajudando a compreender o que ocorre em cada arranjo.

O primeiro evento a ser testado será a ocorrência de uma falha no equipamento **X1** encontrado em todos os três arranjos. A falha causa a abertura do disjuntor **D5** e o SE2 trata de isolar o equipamento **X1** abrindo as duas chaves próximas a **D5** e a **X1**. Com a falha, a *saída S2* (chamemos de *saída* para simplificar, tudo o que possa ser um alimentador ou uma linha de

transmissão) fica sem energia. Até esse momento as ações tomadas pelo SE2 foram idênticas nos três casos.

A partir desse momento, o SE2 busca uma forma de reenergizar S2. Novamente, nos três casos o caminho é via o *bypass*, fechando suas chaves, a chave C1 e o disjuntor D3. Acontece que a falha ocorreu em um momento de grande demanda (informação passada ao SE2), sendo que a entrada *Furnas1* atingiu seu limite máximo. Dessa forma, a reenergização via *bypass* fica inviável para Tanquinho 1 e 2, uma vez que sua utilização faz com que a saída S2, que antes era alimentada por *Furnas2*, passe a ser alimentada por *Furnas1*, o que causa violação de capacidade nessa última.

Assim sendo, o SE2 procura uma nova maneira de realimentar S2. Esse novo caminho poderia ser utilizando as chaves C1 e C2. Essa solução, infelizmente, não pode ser executada. Isso se deve ao fato de que Tanquinho é uma subestação de transmissão e, segundo o especialista, não se pode energizar S2 diretamente pela linha de entrada de *Furnas2*, pois significa que S2 fica sem proteção de um disjuntor (interno à subestação). Também não se pode reenergizar S2 "pendurando-o" no disjuntor D6 da saída S3 (fechando as chaves C1 e C3). Embora a capacidade de D6 possa suportá-las (S2 e S3), em uma subestação de transmissão cada disjuntor só pode "proteger" uma única saída. Novamente, de acordo com o especialista, isso se deve ao que ele chama de *proteção à distância*. Essas duas regras não se aplicam às subestações de distribuição.

Sabendo dessas regras, o SE2 então conclui que, para os arranjos 1 e 2 de Tanquinho, a falha em X1 causa uma interrupção irrecuperável em S2.

Contudo, Tanquinho 3 devido à localização diferenciada e privilegiada de seu *bypass*, teve S2 alimentado por *Furnas2* (o SE2 fechou os elementos dinâmicos do *bypass*, a chave C1 e a chave seccionadora de barramento C5). Isso mostra que a colocação do *bypass* da maneira efetuada no terceiro arranjo, contribuiria de forma positiva no índice de confiabilidade em relação aos outros dois arranjos, para os eventos ocorridos.

O próximo teste feito nos arranjos foi a ocorrência de dois eventos (contingência dupla). O primeiro evento nesse caso, é uma falha (curto_circuito) que ocorre no ponto **X3**, fazendo com que a proteção externa (disjuntor da linha de transmissão de *Furnas2*) abra e desconecte a subestação, deixando **S2** e **S3** imediatamente sem energia.

Para reenergizar essas saídas, o SE2 utiliza-se dos elementos dinâmicos seccionadores do barramento principal (chave **C4** em Tanquinho 1; chaves **C4** e **C5**, e o disjuntor **D7** em Tanquinho 2; chaves **C4** e **C5** em Tanquinho 3), conectando **S2** e **S3** à *Furnas1* (supondo que nesse caso não há problema de capacidade nesta última).

Conseguida a reenergização das saídas, como descrito, ocorre um novo evento (contingência dupla), uma falha no barramento principal (no ponto **X2**). Essa falha, nos arranjos 1 e 3, causa a abertura do disjuntor **D1** deixando todas as saídas sem energia. Já no caso do arranjo 2, causa a abertura somente do disjuntor **D7**, impedindo que todas as saídas fiquem sem energia (a saída **S1** continua energizada).

Em todos os três arranjos, a contingência dupla faz com que apenas uma das saídas alimentadas por *Furnas2* (**S2** ou **S3**, dependendo da prioridade) possa ser realimentada, ficando a outra sem energia pelo menos enquanto durar o reparo de **X2**. O SE2 reenergiza uma dessas duas saídas respeitando a prioridade (previamente determinada). Supondo que a saída escolhida seja a **S2**, o Sistema Especialista utiliza o bypass e a chave **C2**. Relembrando, o SE2 não pode reenergizar ambas as saídas porque se trata de uma subestação de transmissão e há o problema da proteção de longa distância, segundo o próprio especialista.

Esse teste procurou mostrar que a existência do disjuntor **D7** no arranjo 2, impediu que **S1** sofresse interrupção devido a uma falha em **X2**, ao contrário do que ocorreu com os arranjos 1 e 3. Embora essa interrupção em **S1** seja momentânea (basta religar **D1**), ela depende do tempo gasto para isolar o ponto defeituoso (**X2**). Dessa forma, a colocação do disjuntor **D7** seccionando o barramento principal, para os eventos ocorridos nesse exemplo, resultou em

uma contribuição positiva no índice de confiabilidade em relação aos outros dois arranjos.

5- Conclusões

A motivação inicial deste trabalho foi a necessidade real da Cia. Paulista de Força e Luz (CPFL) possuir um sistema computacional que pudesse auxiliar seus engenheiros no Estudo de Confiabilidade de Subestações. Para suprir essa necessidade foi desenvolvido um Sistema Especialista, batizado de SE2, mais um exemplo da utilização desse tipo de tecnologia aplicado a problemas de Energia Elétrica.

Com a construção do protótipo e com os testes realizados, é possível concluir que o SE2 está apto a desempenhar o papel para o qual foi desenvolvido, tornando-se uma ferramenta muito útil para o Estudo de Confiabilidade de Subestações. A boa aceitação por parte dos técnicos, entre outras coisas, se deve à interface gráfica, que permite observar de forma clara e detalhada, as ações e reações do SE2 sobre o arranjo apresentado na tela do computador, que por sua vez, é cópia fiel do unifilar de uma subestação real.

Com o principal objetivo atingido, buscou-se novas possíveis aplicações para o Sistema Especialista. Essa busca se deu em diversas áreas dentro da CPFL, e resultou no interesse de várias delas em utilizar o SE2 em outras frentes.

Uma dessas áreas é a de treinamento de operadores. A forma com que o SE2 interage com o usuário, permitindo ou não certas ações sobre a topologia, e também sugerindo e implementando manobras de reenergização e colocação de equipamentos em manutenção, tudo isso visto de forma clara e detalhada na tela do computador, faz com que esse sistema possa ser empregado no treinamento de operadores. O técnico a ser treinado pode simular qualquer evento, em qualquer arranjo de subestação da CPFL, acompanhando suas conseqüências e as melhores atitudes a serem tomadas, principalmente levando em consideração a segurança, com a facilidade de poder observar claramente quais ilhas estão energizadas e por onde está passando corrente elétrica.

Uma nova frente se abre também nas áreas de operação do sistema elétrico. Se unirmos as qualidades da interface gráfica à velocidade com que o SE2 toma suas decisões, têm-se uma ferramenta ágil de apoio à tomada de decisão em relação a manobras em subestações, tanto as realizadas ou sugeridas remotamente nos Centros de Operações, como aquelas realizadas localmente na própria subestação, auxiliando os operadores que podem observar previamente (através de simulação) os resultados e conseqüências de uma manobra. Mais uma vez, o usuário teria a sua disposição todos os arranjos de subestações da CPFL, e as facilidades apresentadas pela interface gráfica.

Dentro também da área de operação, vislumbra-se a utilização do SE2 no plano de automação da operação em subestações. Todavia, diferentemente das outras frentes citadas anteriormente, que podem ser implementadas em curtíssimo prazo, essa última necessita de um período de tempo um pouco mais longo. Serão necessários, entre outras coisas, a conexão com sistemas de supervisão já existentes, além do desenvolvimento de outros sistemas especialistas, responsáveis por outras tarefas também fundamentais para a complementação do plano de automação. Isso implica que o SE2 deverá "conversar" com outros "sistemas inteligentes", e embora isso possa parecer, a princípio, uma tarefa complexa, a construção do SE2 de forma modular, com interfaces bem definidas (fazendo com que a "comunicação" de outros módulos ou sistemas com o módulo do Sistema Especialista se dê através de Eventos, como detalhado no Capítulo 3), poderá facilitar essa interação. Essa deve ser a continuação natural desse trabalho.

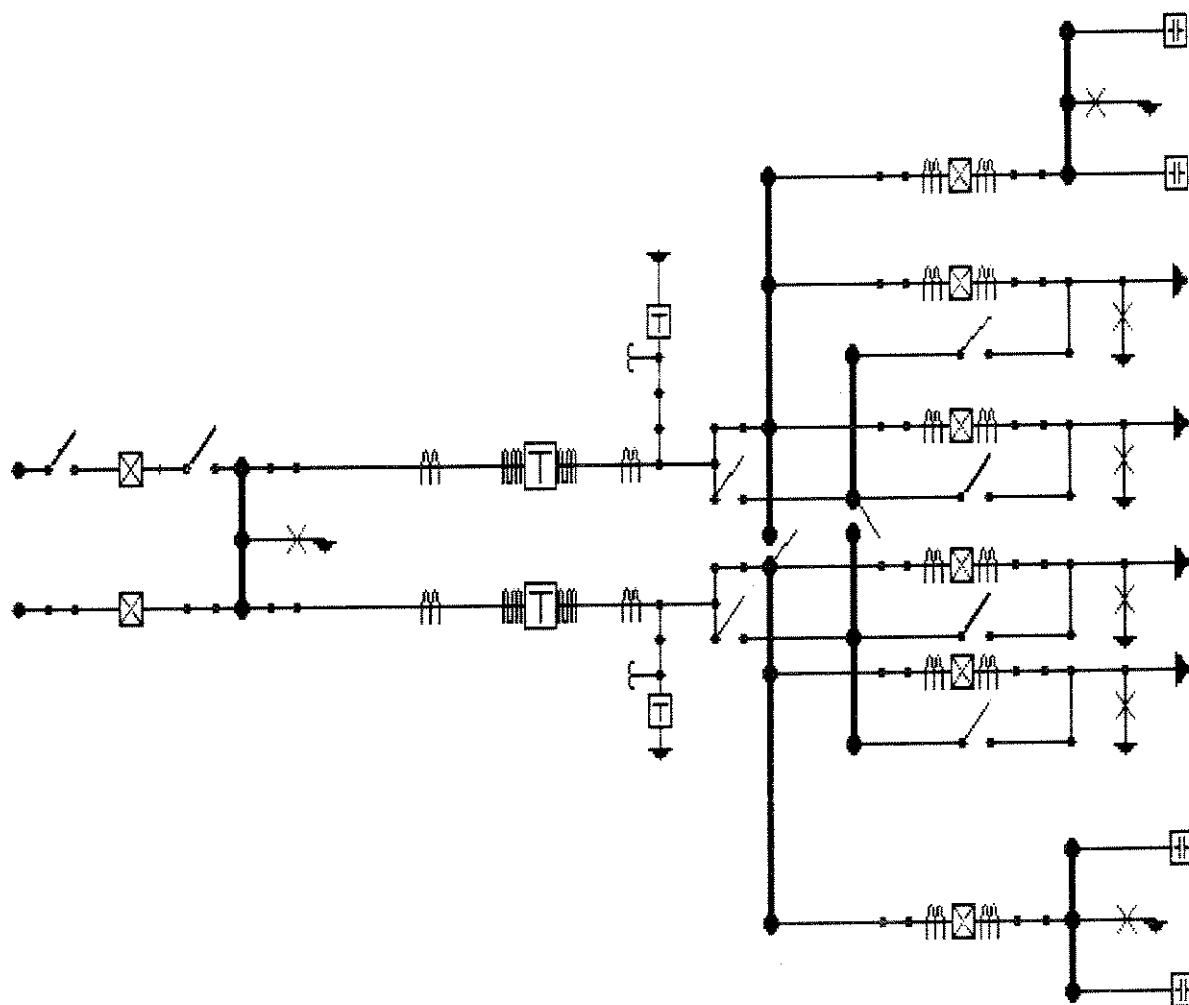
Uma deficiência do SE2 é a dificuldade de alterar a sua base de regras, devido ao seu aspecto "fechado". Não há uma forma amigável, para um possível usuário, de alterar as regras (uma vez que elas se encontram no código executável, e não em um arquivo de dados), para que novas possibilidades ou mudanças de conduta possam ser testadas. Além disso a base de regras é difícil de se "abrir" (deixá-la acessível ao usuário), uma vez que suas regras, incondicionalmente, devem interagir com estruturas de dados complexas (que representam os fatos). Isso torna o sistema pouco flexível em relação à sua base

de regras. Essa para ser modificada, é necessário alterações no próprio código fonte e posterior compilação.

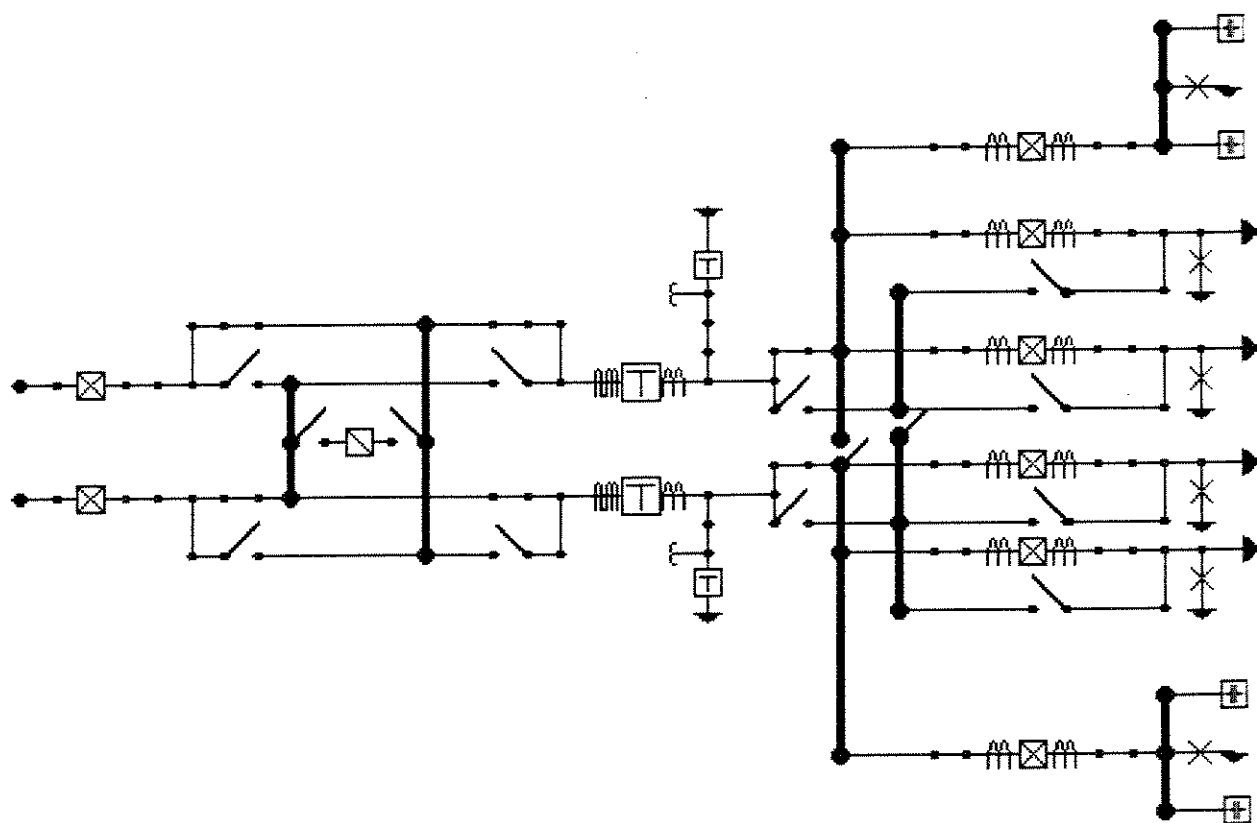
Por outro lado, essa deficiência pode ser um mecanismo de segurança, se pensarmos a respeito do plano de automação ou mesmo no auxílio à tomada de decisão em manobras em subestações. Vendo por esse prisma, se facilitarmos a alteração da base de regras, poderá haver uma má utilização dessa facilidade, ficando sujeito a todo o tipo de ação, até mesmo criminosa, podendo comprometer a integridade de todo o sistema. De qualquer forma, se houver interesse por parte dos usuários, essa deficiência pode ser superada seja com a preparação de novos recursos humanos, tornando-os aptos a trabalhar com o código fonte, pelo menos o do módulo da base de regras, tornando mais fácil as alterações ou inclusões de novas regras, ou seja com o desenvolvimento de um ambiente de programação que possibilite a "abertura" dessas regras, deixando-as fora do código executável.

Como continuidade desse trabalho, pretende-se iniciar os estudos para sua utilização na automação de subestações, começando com o desenvolvimento necessário para o enlace de dados com os sistemas de supervisão já existentes na CPFL e, posteriormente, com o desenvolvimento de outros Sistemas Especialistas fundamentais à complementação ao plano de automação, tais como um Sistema Especialista em Processamento de Alarmes e um Sistema Especialista em Diagnóstico de Falhas.

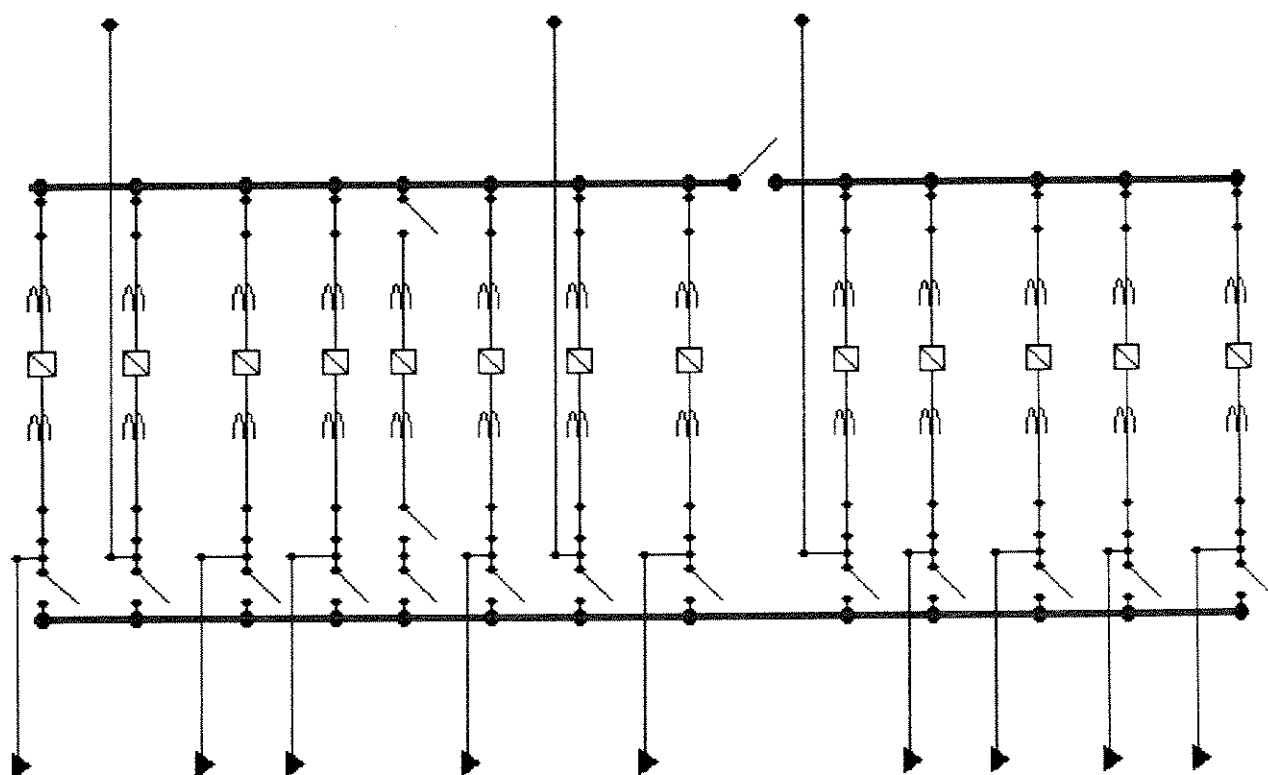
Apêndice 1



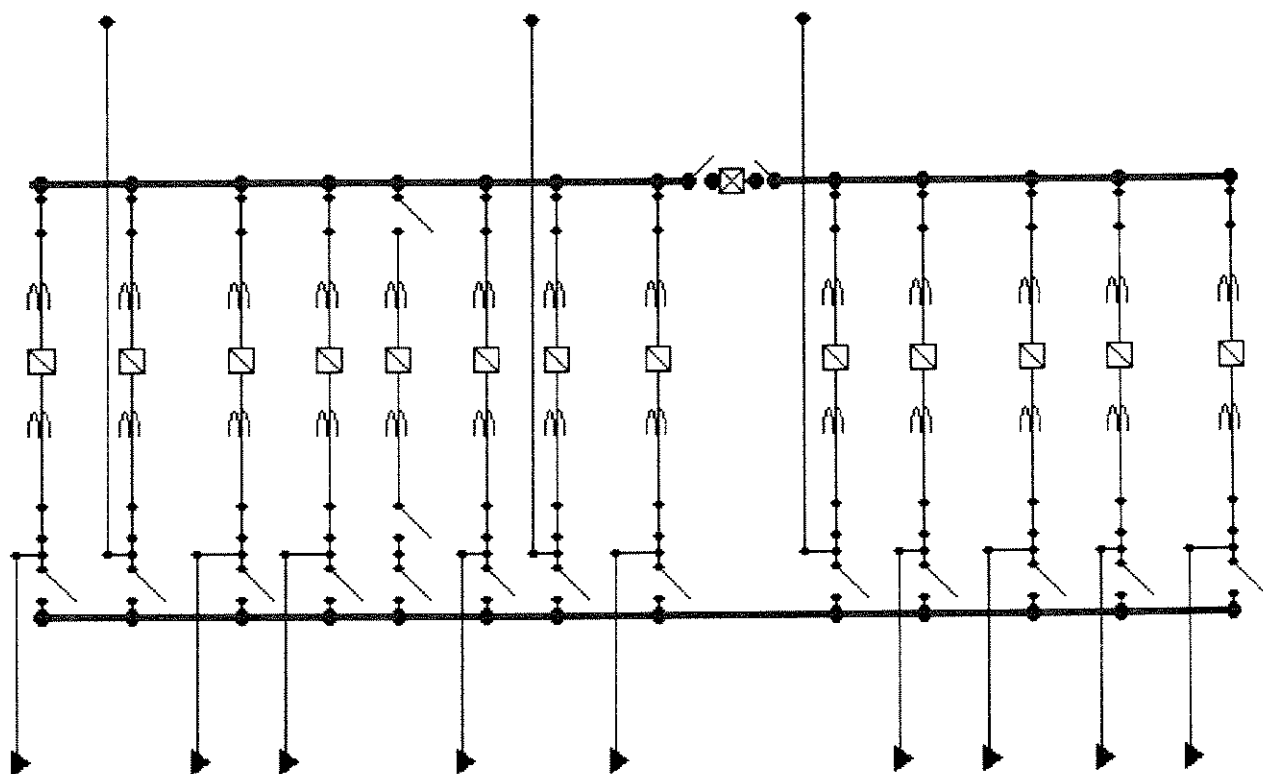
Arranjo SUB1: Barra Simples



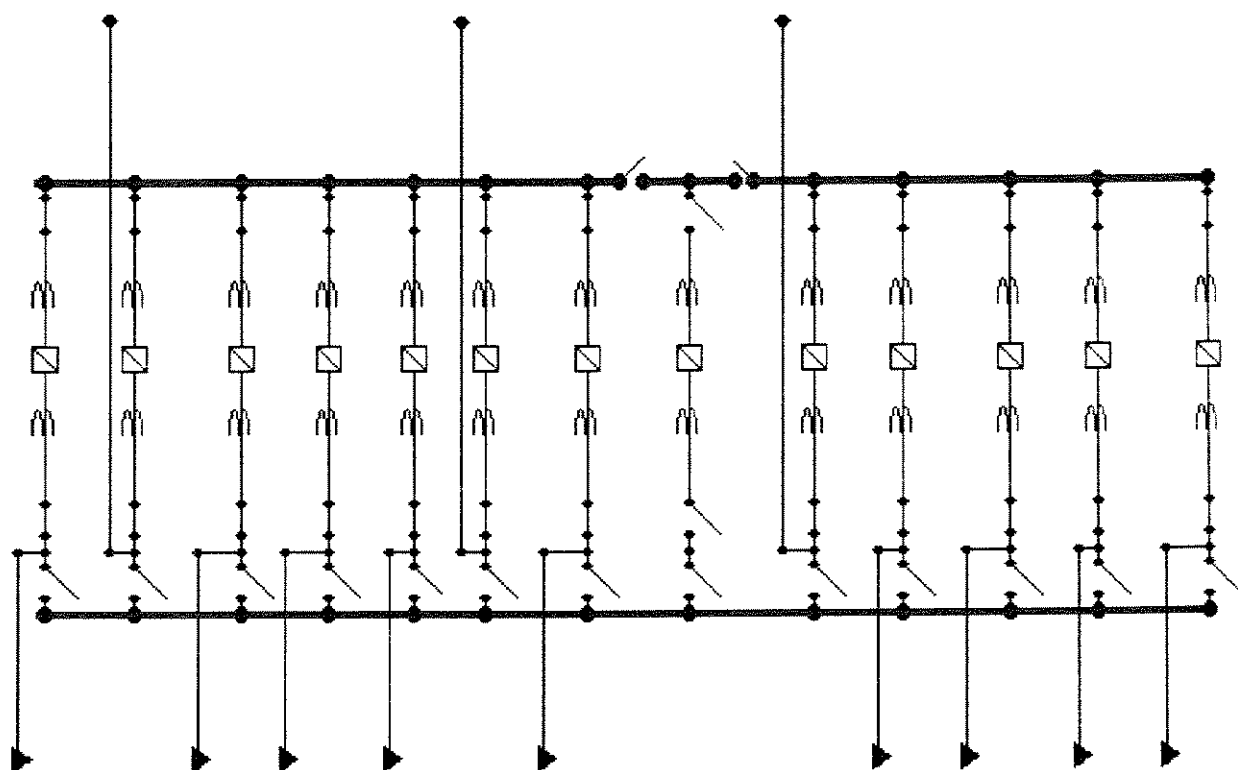
Arranjo SUB2: Barra Dupla



Arranjo Tanquinho 1



Arranjo Tanquinho 2



Arranjo Tanquinho 3

BIBLIOGRAFIA

- [Ara] - Evandro O. Araujo, Júlio C. B. Queiroz, Davidson G. Ferreira.
- *Um Processador de Alarme Inteligente.*
- SBA Controle & Automação , Vol 4 , No 2, Maio/Junho 1994.
- [Bij] - R. W. Bijoch, S. H. Harris, T. L. Volkmann, J. J. Bann, B. F. Wollemberg.
- *Development and Implementation of the NSP Intelligent Alarm Processor.*
- IEEE Transactions on Power Systems , vol. 6, No 2 , Maio 1991.
- [Bro] - Roberto P. Broadwater, Jeffrey C. Thompson, Saifur Rahman, Al Sargent.
- *An Expert System for Integrated Protection Design with Configurable Distribution Circuits.*
- IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 2, Abril 1994.
- [Cam] - C. Celso De Brasil Camargo.
- *Confiabilidade Aplicada a Sistemas de Potência Elétrica.*
- LTC / Eletrobrás / FEESC , Livros Técnicos e Científicos Editora.
- [Cav] - C. Cavelucci.
- *Sistema Especialista em Manobras de Redes de Distribuição de Energia Elétrica.*
- Tese de Mestrado, FEE / UNICAMP , 1989.
- [Coh] - R. M. Cohen, J. H. May, H. E. Pople.
- *An Intelligent Workstation for Electrocenter Design.*
- IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, vol. SMC 17, n.2, Mar/Abr 1987.
- [Del] - B. Delfino, M. Invernizzi, A. Morini.
- *Knowledge Based Restoration Guidelines.*
- IEEE Computer Applications in Power, vol 5, No. 3, Julho 1992.
- [Fei] - E. A. Feigenbaum, B. G. Buchanan.
- *Dendral and Meta Dendral, Their Applications Dimension.*
- Artificial Intelligence, Nov. 1978.
- [Hor] - Ellis Horowitz, Sartaj Sahni.
- *Fundamentos de Estruturas de Dados.*
- Editora Campos, 2a. Edição, 1986.

[Hsu] - Y. Y. Hsu, F. C. Lu, Y. Chien, J. P. Liu, J. T. Lin, H. S. Yu, R. T. Kuo.

- *An Expert System for Locating Distribution System Faults.*

- IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 6, No 1, Janeiro 1991.

[Jen] - P. A. Jensen, J. W. Barnes.

- *Network Flow Programming.*

- John Wiley & Sons, 1980.

[Kam] - S. D. Kamimares, A. V. Machias, B.C. Papadias.

- *An Intelligent Tool for Distribution Substations Troubleshooting and Maintenance Scheduling.*

- IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 6, No 3, Julho 1991.

[Kan] - Ta-Kang Ma, C. C. Liu, Men-Shen Tsai, R. Rogers, S. L. Machlinski, J. Dodge.

- *Operational Experience and Maintenance of an On-Line Expert System for Customer Restoration and Fault Testing.*

- IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 2, Maio 1992.

[Kim] - T. Kimura, S. Nishimatsu, Y. Ueki, Y. Fukuyama.

- *Development of an Expert System for Estimating Fault Section in Control Center Based on Protective System Simulation.*

- IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 7, No 1, Janeiro 1992.

[Kin] - P. Kinnucan.

- *Computers that think like Experts.*

- High Technology Magazine, vol. 71, Janeiro 1984.

[Kir] - Daniel S. Kirschen, Bruce F. Wollemberg.

- *Intelligent Alarm Processing in Power Systems.*

- Proceedings of IEEE, vol 80, No 5, Maio 1992.

[Koj1] - Y. Kojima, S. Warashina, S. Nakamura, K. Matsumoto.

- *Development of a Guidance Method for Power System Restoration .*

- IEEE Transactions on Power Systems, vol. 4, No. 3, Agosto 1989.

[Koj2] - Y. Kojima, S. Warashina, M. Kato, H. Watanabe.

- *The Development of Power System Restoration Method for a Bulk Power System by Applying Knowledge Engineering Techniques .*

- IEEE Transactions on Power Systems, vol. 4, No. 3, Agosto 1989.

- [Kum]** - S. Kumano, H. Ito, T. Goda, Y. Uekubo, S. Kyomoto, H. Kourogi, Y. Ariura.
 - *Development of Expert System for Operation at Substation.*
 - IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 8, No 1, Janeiro 1993.
- [Lin]** - C. E. Lin, J. M. Ling, C. L. Huang.
 - *An Expert System for Transformer Fault Diagnosis Using Dissolved Gas Analysis.*
 - IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 8, No 1, Janeiro 1993.
- [Liu1]** - C. C. Liu, K. Tomsovic
 - *An Expert System Assisting Decision Making of Reactive Power/Voltage Control.*
 - IEEE Trans. on Power Systems, vol. PWRS 1, n. 3, Ago. 1986.
- [Liu2]** - C. C. Liu .
 - *An Expert System Operational Aid for Restoration and Loss Reduction of Distribution Systems.*
 - Proc. of the Power Industry Computer Application Conf., Maio 1987.
- [Mat]** - K. Matsumoto, T. Sakaguchi, R. J. Kafka, M. M. Adibi.
 - *Knowledge Based Systems as Operational Aids in Power System Restoration.*
 - Proceedings of IEEE, vol. 80, No 5, Maio 1992.
- [Min]** - M. Gondran, M. Minoux.
 - *Graphs and Algorithms.*
 - John Wiley & Sons, Interscience Publication.
- [Nea]** - R. E. Neapolitan.
 - *Foward Chaining versus a Graph Approach as the Inference Engine in Expert Systems.*
 - SPIE vol. 635, Proceedings of Applications of Artificial Intelligence III, abril 1986.
- [Pro]** - C. A. Protopapas, K. P. Psaltiras, A. V. Machias.
 - *An Expert System for Substation Fault Diagnosis and Alarm Processing.*
 - IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 6, No 2, Abril 1991.
- [Put]** - H. B. Puttgen , J. Jansen.
 - *"ASDEP", an Expert System for Eletric Power Plant Design.*
 - IEEE Expert, vol.2, n.1, 1987.

[Rot] - F. Hayes Roth.

- *Knowledge Based Expert Systems.*
- IEEE Computer, vol. 17, n.10, Outubro 1984.

[Sak] - T. Sakaguchi , K. Matsumoto.

- *Development of a Knowledge Based System for Power System Restoration.*
- IEEE Trans. on PAS, vol.102, n.2, Fev. 1983.

[Tal1] - S. N. Talukdar , Eleri Cardozo, Ted Perry.

- *The Operator's Assistant, an Intelligent Expandable Program for Power System Trouble Analysis.*
- IEEE Trans. on Power System , vol. PWRS 1, n. 3, Ago. 1986.

[Tal2] - S. N. Talukdar, Eleri Cardozo.

- *A Distributed Expert System for Fault Diagnosis.*
- Proc. of the PICA Conf. , Maio 1987.

[Tes] - Daniel B. Tesch, David C. Yu, Li Min Fu, K. Vairavan.

- *A knowledge Based Alarm Processor for an Energy Manegement System.*
- IEEE Transactions on Power Systems , vol. 5, No 1 , Fevereiro 1990.

[Tom] - K. Tomsovic, C. C. Liu, P. Akerman, S. Pope.

- *An Expert System as a Dispatchers, Aid for Isolation Line Section Faults.*
- IEEE Trans on Power Delivery, vol. PWRD 2, n.3, Jul 1987.

[Wat] - Donald A. Waterman.

- *A Guide to Expert Systems.*
- Addison Wesley Publishing Company, 1985.

[Wol] - Bruce F. Wollemberg.

- *Feasibility Study for an Energy Management System, Intelligent Alarm Processor.*
- IEEE Transactions on Power Systems , vol. PWRS 1, No 2 , Maio 1986.