

UM SISTEMA BASEADO EM CONHECIMENTO PARA AUXÍLIO DE MANOBRAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Celso Cavellucci

CPFL
CP 1808 - 13085 - Campinas - SP

Christiano Lyra

FEE/UNICAMP
CP 6101 - 13081 - Campinas - SP

Resumo - Este trabalho descreve um sistema baseado em conhecimento para auxiliar na elaboração de Planos de Manobra para redes de distribuição de energia elétrica. O sistema é híbrido, integrando computação simbólica (implementada em PROLOG) com computação numérica (implementada na linguagem C). Requisitos que dependem da experiência do operador são representados por regras de produção. A avaliação dos requisitos elétricos (queda de tensão e capacidade de corrente) é obtida pelo simulador de manobras, que utiliza o método dos momentos e conceitos de grafos no armazenamento e tratamento dos dados físicos e elétricos da rede de distribuição.

Abstract - This paper describes a knowledge based system designed to assess decisions for restoration of distribution systems. The knowledge based system is hybrid, in the sense that it uses symbolic and numeric computation algorithms. Features that depends on system operator's experience are represented by production rules, implemented in Prolog. The electrical overloads checks are carried out by a special simulator based on the method of momentums, implemented in C. Concepts and data structures borrowed from graph algorithms are used in the simulator to achieve efficiency.

1. INTRODUÇÃO

A ocorrência de interrupções programadas ou não programadas (emergenciais) em uma rede de distribuição de energia elétrica obriga a realização de manobras de isolamento e restabelecimento da rede. As operações que definem uma manobra devem obedecer requisitos elétricos e critérios previamente estabelecidos, normatizados por órgãos governamentais ou pela concessionária de distribuição de energia elétrica. O conjunto de procedimentos adotados na execução da manobra denomina-se *Plano de Manobra*.

Os operadores de rede são responsáveis pela execução dos planos de manobra. Nesta tarefa é requerida análise detalhada das possibilidades de manobras, buscando uma alternativa que satisfaça requisitos elétricos, exigências de segurança, critérios sociais e normas da concessionária. A necessidade de uso da experiência anteriormente adquirida no desempenho da função e do julgamento próprio

dos engenheiros e técnicos na elaboração de planos de manobras impedem uma abordagem puramente analítica do problema.

Como considerar os aspectos empíricos nos modelos matemáticos? Duas abordagens são utilizáveis. Na primeira, acrescenta-se heurística à formulação matemática como elemento restritivo de soluções indesejadas, tornando assim o modelo mais "inteligente" (Castro e outros, 1980; Castro Jr., 1985). Outra abordagem, mais recente, emprega técnicas de representação e tratamento do conhecimento, objeto de estudo da inteligência artificial (Winston, 1984; Rich, 1983). A aplicação prática destas técnicas no processo de diagnóstico e tomada de decisões na operação de sistemas de potência acrescenta uma metodologia flexível ao desenvolvimento de programas (Wollenberg, 1987; Cavellucci, 1989). Os sistemas e protótipos desenvolvidos abrangem várias áreas: controle de potência/tensão (Liu e outros, 1988; Cheng e outros, 1988), processamento de alarmes (Wollenberg, 1987), proteção (Talakudar e outros, 1985), diagnóstico (Talakudar e outros, 1985; Keronem, 1989), previsão de carga (Rahman e Bhatnagar, 1988), fluxo de carga (Fujiwara e outros, 1985), planejamento da operação (Keronem, 1989) e restabelecimento de redes elétricas (Harmon e King, 1985; Morelato e Monticelli, 1989; Sakaguchi e Matsumoto, 1983; Liu e outros, 1988).

Este trabalho descreve um sistema baseado em conhecimento, denominado RD, projetado para sugerir alternativas de planos de manobras em redes de distribuição de energia elétrica. A abordagem apresentada contribui em dois aspectos: utilização de técnicas de Sistema Baseado em Conhecimento híbrido (computação simbólica interagindo com computação numérica) e desenvolvimento de algoritmos de grafos de alto desempenho aplicados à simulação de redes de distribuição. Essas características permitem tratar o conhecimento do operador de forma explícita e flexível, sem perder o bom desempenho computacional dos algoritmos procedurais.

2. MODELO DE GRAFO PARA REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Algumas entidades de interesse na rede de distribuição são: bloco, chave, alimentador, subestação e a própria rede de

distribuição. Define-se *bloco* (ou bloco de carga) como a parcela da rede primária (13,8 KV) conexa sem possibilidades de seccionamento pela operação de *chaves*. O conjunto de blocos ligados por chaves fechadas e energizados a partir da mesma fonte denomina-se *alimentador*. Uma *subestação* possui um ou mais alimentadores e a *rede de distribuição* uma ou mais subestações.

O modelo de grafo é conveniente para representar as funções e relações entre as entidades da rede. No grafo da Figura 1, os nós representam os blocos de carga, exceção feita aos nós R e S_n ($n = 1, 2, \dots$), que representam o nó de fechamento de rede e as subestações, respectivamente. Os arcos representam chaves de manobra.

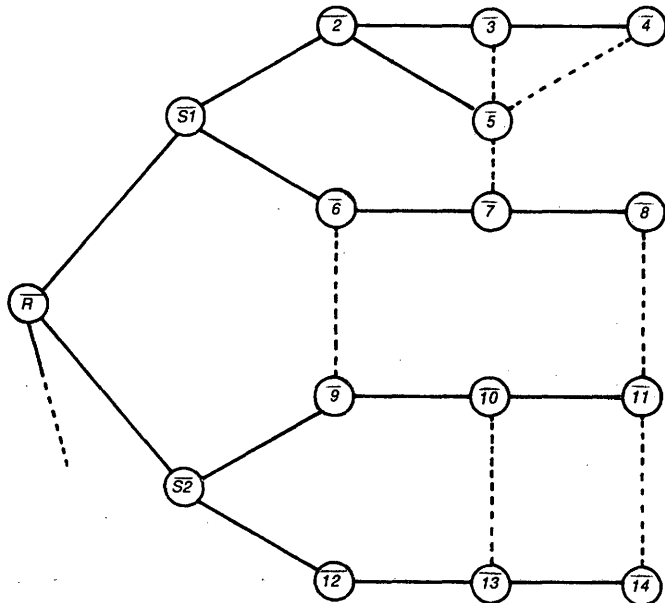


Figura 1. Modelo de Grafo para Rede de Distribuição.

A rede energizada compreende todos os elementos de rede (blocos e chaves fechadas) ligados entre si física e eletricamente. Na Figura 1, os nós e os arcos representados por linhas cheias pertencem à rede energizada. Os arcos representados por linhas tracejadas são chaves abertas, que definem as ligações físicas possíveis da rede de distribuição.

3. ESTRUTURA CONCEITUAL DO SISTEMA RD

A estrutura conceitual do RD está representada esquematicamente na Figura 2. Nela são apresentados os módulos básicos que compõem o sistema RD: Máquina de Inferência, Base de Conhecimento, Gerenciador de Rede e Simulador de Manobra.

Quando ocorre uma contingência, o primeiro passo no plano de manobras é isolar o bloco com defeito da rede em operação, através da abertura de chaves adequadas. Isolado o bloco com defeito, fica delimitada uma "área escura". O próximo passo é procurar chaves que permitam reestabelecer energia a maior parte possível da área escura. Para elaborar o plano de manobras o operador de rede necessita conhecer a topologia da rede e os valores das grandezas elétricas (queda de tensão e corrente), além de seguir normas e usar sua experiência em operação de rede. No sistema RD estes conhecimentos são mantidos da seguinte forma:

- a topologia da rede é armazenada no arquivo *dados da rede* e manipulada pelo *gerenciador de rede*.

- as grandezas elétricas são obtidas pelo *simulador de manobras*.
- informações sobre a operação de rede (adquirida com treinamento, experiência profissional e instruções normativas) estão representadas na *base de conhecimento*.

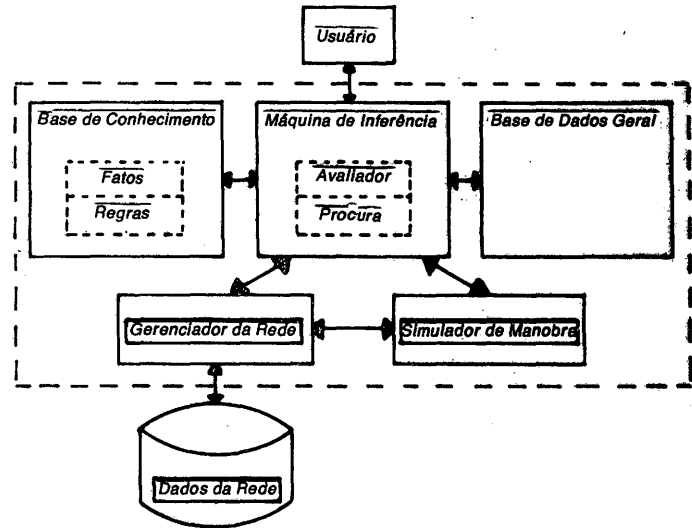


Figura 2. Arquitetura do RD.

A seguir são discutidos os aspectos de modelagem e implementação de cada um destes módulos de conhecimento.

3.1. Conhecimento sobre a topologia da rede

No sistema RD a topologia da rede de distribuição é armazenada numa estrutura de dados para grafos denominada *Orientada por Arco* (Jensen e Barnes, 1980). Nesta estrutura, os elementos básicos de armazenamento são as listas, $\phi = \{o_k\}$ e $\pi = \{t_k\}$, indexadas pelos arcos do grafo. O k -ésimo elemento das listas ϕ e π são, respectivamente, os nós origem e término do arco k . A árvore que representa a rede energizada é armazenada por uma estrutura em preordem (Jensen e Barnes, 1980; Kennington e Helgason, 1980), através de três apontadores: P_B , P_P e P_F . Para um nó i , arbitrário, da árvore temos:

$P_B(i)$: apontador para o arco que liga ao antecessor do nó i .

$P_P(i)$: apontador para o nó antecessor de i na árvore.

$P_F(i)$: apontador para o próximo nó quando a árvore é percorrida em pré-ordem.

A Figura 3. exemplifica a estrutura em pré-ordem. A linha tracejada, ligando os nós da árvore, representa graficamente o apontador P_F . Além dos apontadores acima, a estrutura de dados implementada no RD é acrescida do rótulo $P_D(i)$, que define o nível ou profundidade do nó i , isto é, número de nós da raiz a um nó i arbitrário (Jensen e Barney, 1980).

Essa estrutura de dados incorpora o resultado de um longo e bem sucedido esforço de pesquisa no desenvolvimento de algoritmos eficientes para encontrar fluxos de custo mínimo em redes (Bradley e outros, 1977).

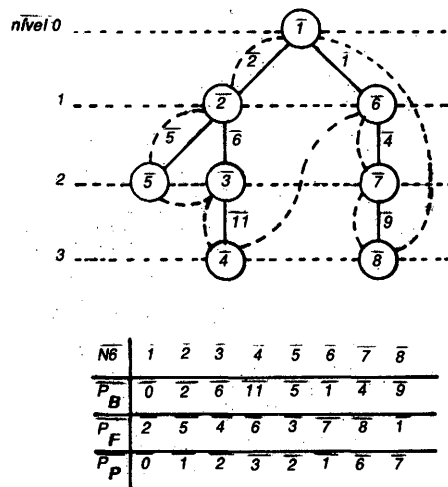


Figura 3. Armazenamento da árvore em pré-ordem.

3.2. Conhecimento para avaliação dos requisitos elétricos

Durante o processo de decisão sobre qual chave deve ser fechada para o restabelecimento da energia à área escura, é importante prever os efeitos desta operação antes de efetivá-la. A avaliação dos requisitos elétricos é executado pelo simulador de manobra, usando o Método dos Momentos (Kasatkin e Perekalin, 1970; Gonet, 1986; Marcelic, 1957). Os fluxos nas chaves e a queda de tensão nos blocos de carga são obtidos por procedimentos de cálculo e manipulação da rede semelhantes àqueles necessários à solução de problemas de fluxo de custo mínimo. Esta observação permitiu que transportássemos para o tratamento da rede de distribuição parte dos melhores resultados obtidos no campo de fluxos em redes.

A Figura 4, ilustra o estado da rede de distribuição após uma contingência. Os blocos hachurados pertencem à rede energizada, o bloco com defeito (em preto) já foi isolado por manobras anteriores e a área escura está demarcada por um retângulo.

Suponhamos que a chave k seja candidata a energizar a área escura e a carga a ser transferida seja Δp , que compreende o somatório das cargas próprias dos blocos pertencentes à área escura. O algoritmo descrito a seguir simula o efeito do fechamento da chave k na rede de distribuição.

Algoritmo de Simulação de Manobra

Passo 1. Atribuições iniciais

Sejam b_f o bloco fonte e b_c o bloco carga da chave k
 Faça capacidade = NO_LIMITE e
 queda-tensão = NO_LIMITE

Passo 2. Avalie a capacidade da subestação suprir Δp .

Passo 3. Avalie a capacidade física da chave K .

Passo 4. Avalie a queda de tensão no bloco fonte (b_f).

Passo 5. Avalie da queda de tensão no bloco carga (b_c).

Passo 6. Avalie a queda de tensão nos blocos terminais da área escura.

Passo 7. Avalie a capacidade do alimentador do b_c suprir Δp de fluxo.

Passo 8. Avalie a queda de tensão nos blocos terminais do alimentador do bloco b_c .

Se em quaisquer das avaliações as quedas de tensão ou capacidade os limites pré-estabelecidos forem ultrapassados, o algoritmo retorna MANOBRA_NÃO_ACONSELHÁVEL. Caso contrário, o algoritmo retorna MANOBRA_ADEQUADA.

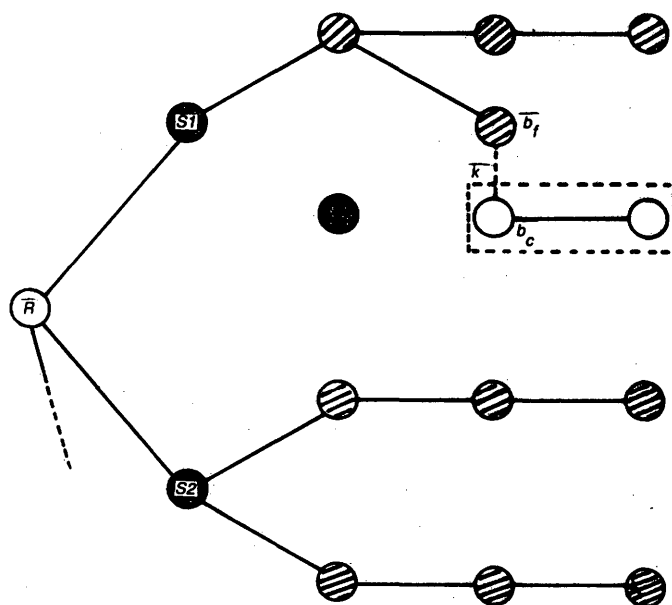


Figura 4. Estado da rede após contingência.

3.3. Conhecimento para operação da rede

No sistema RD o conhecimento sobre manobras em redes de distribuição é representado por *Fatos e Regras de Produção* (Nilsson, 1982). Os fatos são representados por triplas do tipo O-A-V (Objeto-Atributo-Valor) (Winston, 1984; Rich, 1983; Harmon e King, 1985). Nesta representação, os objetos simbolizam entidades físicas (p. ex. *chave de manobra*) ou entidades conceituais (p. ex. *alimentador*). Atributos são características ou propriedades associadas aos objetos (*código e tipo* são atributos do objeto *chave de manobra*.) Por último, o valor estabelece a natureza particular de um atributo em uma dada situação ou instante. O código (um atributo) da chave pode ter, por exemplo, o valor 120 ou a chave é do tipo que permite sua abertura com carga (outro atributo).

A Figura 5. mostra o exemplo de um fato na forma O-A-V. Neste caso o objeto é bloco com defeito e o atributo seu código. No exemplo em particular o código do bloco com defeito é 120 (ou seja, o valor do atributo código é 120).

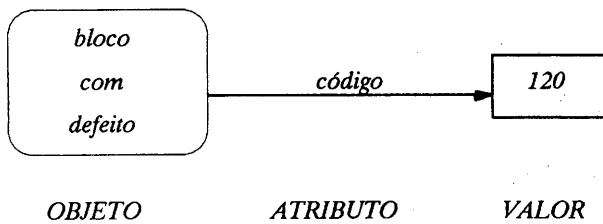


Figura 5. Fato na forma O-A-V.

As regras são usadas para descrever o relacionamento entre os fatos, o que possibilita à máquina de inferência do RD, a partir dos fatos existentes em um dado instante, inferir novos fatos que conduzam à solução do problema. Estas regras são do tipo SE *premissa* ENTÃO *ação*. A premissa é uma conjunção de condições (cláusulas) ligadas pelo operador lógico E. Da mesma forma, a ação é a conjunção de conclusões ligadas pelo operador lógico E. A fig. 6. ilustra uma regra típica do sistema RD.

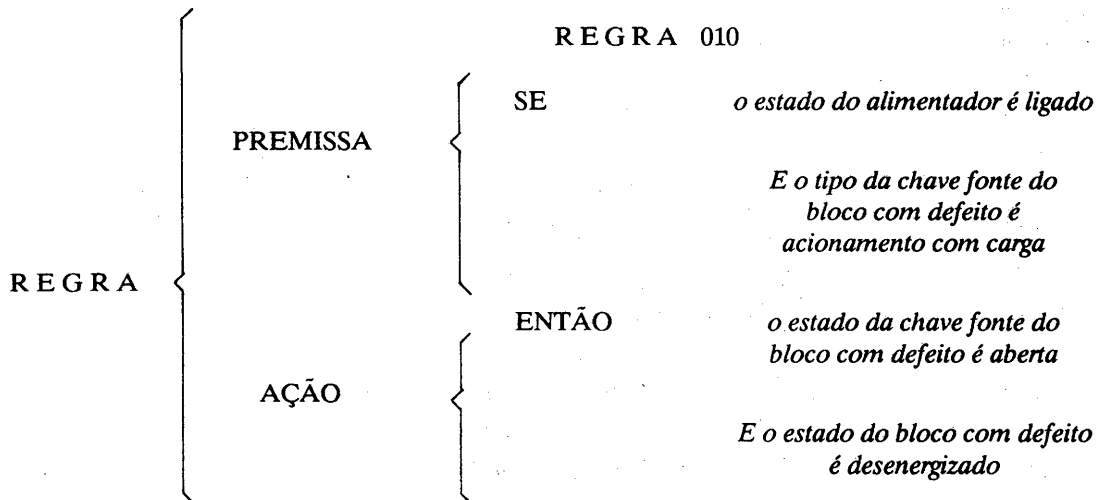


Figura 6. Regra típica do sistema RD.

Tanto as condições como as conclusões são expressas por triplas O-A-V, como ilustra a Figura 7. (a ordem O-A-V está parcialmente invertida na figura para efeito de compreensão).

4. MÁQUINA DE INFERÊNCIA

O módulo de maior importância em um sistema especialista é a Máquina de Inferência. Ela encerra todo mecanismo de raciocínio necessário à condução de uma consulta ao sistema. A máquina de inferência tem dois objetivos principais. Primeiro, avaliar fatos e regras existentes e, quando possível, acrescentar novos fatos à base de conhecimento. Segundo, decidir a ordem em que as regras são avaliadas. Existem várias maneiras de implementar esses objetivos. No desenvolvimento do protótipo do RD algumas máquinas de inferência foram experimentadas. Aquela que melhor se adaptou às necessidades foi baseada nos conceitos do sistema especialista MYCIN (Buchanan e Shortliffe, 1985) e nas idéias propostas por Sakaguchi e Matsumoto (1983) para restauração de sistemas de potência.

A estratégia de inferência usada no RD é do tipo "SE a premissa é verdadeira ENTÃO execute a ação" (Modus Ponens). O controle de inferência dirigido por metas ("backward chaining") é implementado por dois módulos interrelacionados: *AVALIADOR* e *PROCURA* (Figura 8.).

O *AVALIADOR* analisa cada condição da premissa da regra e se todas as condições forem verdadeiras ele executa a ação. Caso contrário, a regra é rejeitada. Durante a análise da premissa o *AVALIADOR* verifica se todos os dados necessários à avaliação da regra já se encontram na base de conhecimento. Se um contexto não existe ou um atributo ainda não se encontra na base de conhecimento o avaliador aciona o mecanismo de busca do *PROCURA*.

O módulo *PROCURA* cria um contexto ou obtém um valor que instancie o atributo solicitado. O instanciamento de um atributo pode levar este módulo a solicitar o valor desconhecido ao usuário, acionar o módulo Gerenciador da Rede ou acionar o módulo Simulador de Manobra para obter dados sobre o estado (físico e elétrico) e interrelacionamento dos elementos da rede, ou ainda, inferir o valor por meio de regras a serem analisadas pelo *AVALIADOR*.

	ATRIBUTO	OBJETO	VALOR
SE	<i>Estado</i>	<i>Alimentador</i>	<i>Ligado</i>
	<i>Tipo chave fonte</i>	<i>Bloco com def</i>	<i>Acion. com carga</i>
ENTÃO	<i>Est. chave fonte</i>	<i>Bloco com def</i>	<i>Aberta</i>
	<i>Estado</i>	<i>Bloco com def</i>	<i>Desenergizado</i>

Figura 7. Regras como triplas O-A-V.

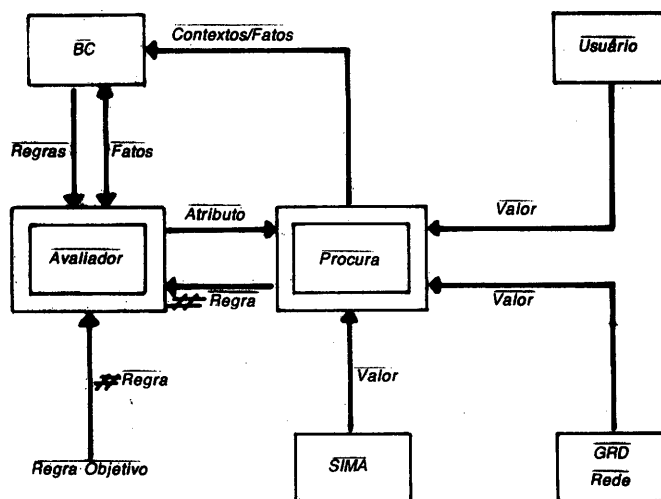


Figura 8. Máquina de inferência do RD.

O processo AVALIADOR \rightleftharpoons PROCURA é recursivo, permite um raciocínio em cadeia, criando uma árvore de contexto dinamicamente (este processo é discutido no próximo item), até a solução do problema. Para disparar este processo é necessário uma regra denominada *regra objetivo*. A regra objetivo traduz os problemas a serem resolvidos pela máquina de inferência, assim como as ações a serem executadas quando uma solução é encontrada.

No início de cada consulta ao RD, a máquina de inferência cria o contexto *rede* e busca na base de conhecimento a regra objetivo para análise do AVALIADOR. A regra objetivo do RD deixa explícitas as tarefas a serem executadas pelo sistema:

SE *o bloco com defeito foi isolado e a rede foi restabelecida*

ENTÃO *apresente o plano de manobras.*

A primeira tarefa é isolar da rede em operação o bloco com defeito e em seguida procurar uma solução de restabelecimento da área escura.

5. ESTRUTURA BÁSICA DE CONSULTA

Os fatos são representados por triplas O-A-V. Os objetos são as entidades físicas ou lógicas conhecidas como *contexto* no qual são aplicadas as regras. Os tipos de contexto são relacionados, hierar-

quicamente, pela árvore de contexto (Buchanan e Shortliffe, 1985; Sakaguchi e Matsumoto, 1983).

Árvore de contexto é a estrutura básica da consulta ao sistema RD. Ela organiza a estrutura conceitual da base de conhecimento, define o fluxo de controle durante a consulta e indica as metas que devem ser derivadas pela máquina de inferência. Cada nó da árvore de contexto representa um *tipo de contexto*, que descreve a forma de instanciamento dos contextos.

Existem dois aspectos relacionados na árvore de contexto: a *árvore estática* dos tipos de contexto e a *árvore dinâmica* das instâncias dos contextos. Esta distinção é importante para entender o processo de raciocínio da máquina de inferência. A árvore estática orienta a criação da estrutura em árvore dos instanciamentos dos tipos de contexto. Esse processo cria uma árvore dinâmica a cada consulta ao sistema RD.

Os tipos de contexto reconhecidos pelo RD são: REDE (rede de distribuição primária), BLCDEF (Bloco de carga onde ocorreu uma contingência), ALIMENTADOR (Alimentador do bloco de carga com defeito), MANOBRA (Conjunto de operações para o restabelecimento da rede) e CHAVE (Chave candidata a restabelecer a rede).

Na Figura 9, está representada a árvore de contexto estática usada pelo sistema RD e a Figura 10, ilustra uma árvore dinâmica gerada numa consulta. Neste exemplo existem 3 chaves candidatas a restabelecer a rede de distribuição.

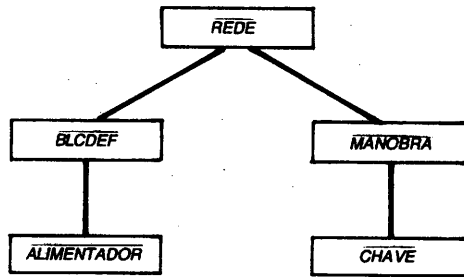


Figura 9. Árvore de contexto do sistema RD.

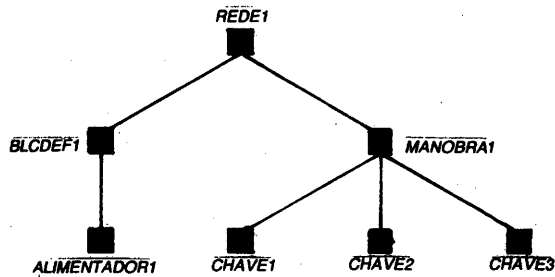


Figura 10. Exemplo de uma árvore dinâmica.

6. EXEMPLO DE CONSULTA

O exemplo descrito a seguir ilustra uma consulta ao sistema RD, aplicado à rede de distribuição primária da Figura 11. Na figura os quadrados representam as subestações, os círculos os blocos de carga e os arcos as chaves fechadas. Após a leitura dos dados da rede, o RD cria o contexto *rede1* e inicia a avaliação da regra objetivo. Na avaliação da premissa da regra objetivo, o RD cria o contexto *blcdef1* para buscar as manobras de isolamento do bloco com defeito, cujo o código é solicitado ao operador de rede. Seja 36 o bloco com defeito. Com estes fatos armazenados na base de conhecimento o RD pode concluir o plano de manobra de isolamento.

Plano de Manobra para Isolamento

Abrir	chave 32
Abrir	chave 39
Fechar	chave 32
Abrir	chave 40

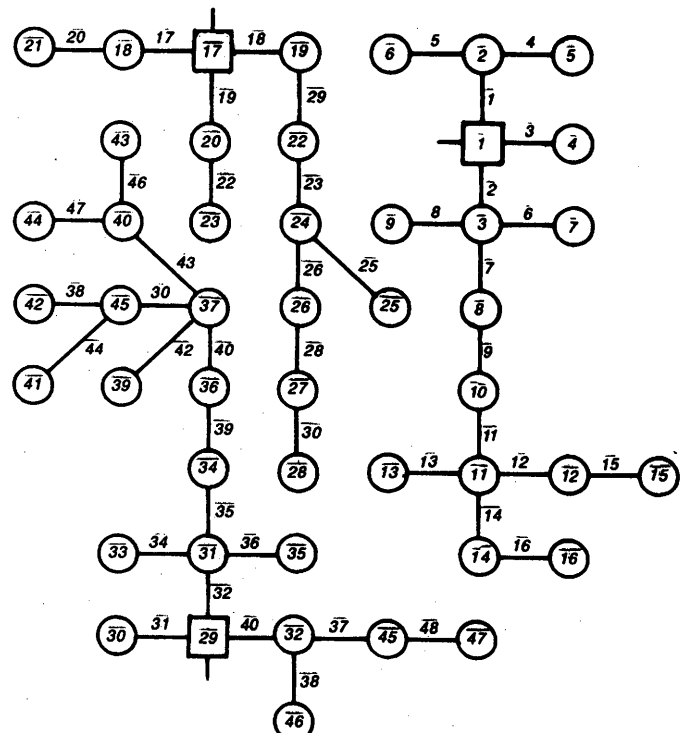


Figura 11. Rede de distribuição primária.

O objetivo do RD agora é a manobra a ser realizada para o restabelecimento da área escura. A avaliação de regras adequadas conduz a busca das chaves candidatas ao restabelecimento da área escura. Para tanto, é criado o contexto manobral e instanciado o número de candidatas com auxílio do módulo Gerenciador da Rede. O RD cria um contexto para cada uma das candidatas e aplica as regras para inferir a chave a ser manobrada. Inicialmente solicita ao módulo Gerenciador da Rede a lista das candidatas, que neste exemplo são as chaves de códigos 40, 29 e 24, enumeradas nesta ordem. Em seguida, cria o contexto chave1 referente à chave 40, que é rejeitada porque o bloco fonte desta chave é o bloco com defeito e ainda não foi reparado. O RD passa a avaliar a chave de código 29. O usuário informa o estado do bloco fonte da chave2, que neste caso é energizado. O RD aciona o módulo Simulador de Manobra para verificar se a manobra da chave2 (código 29) é aconselhável ou não. A Figura 12 mostra a configuração da rede a ser simulada.

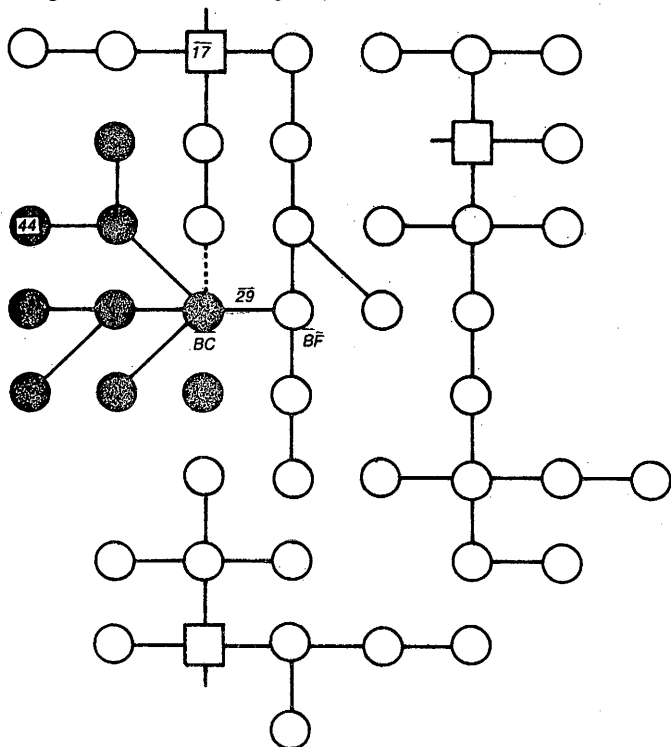


Figura 12. Simulação da chave 29.

5. Verifica máxima queda de tensão na AE.

Limite de queda de tensão: 690.00 V

Máxima QT na área escura: 693.57 V no bloco 44

Manobra não aconselhável ...

A queda de tensão no bloco de carga de código 44 da área escura é 693,57V e, portanto, superior ao limite pré-estabelecido de 690,00 V. Como o resultado da simulação está *fora do limite*, a chave 29 é rejeitada.

A próxima chave candidata a ser avaliada é a de código 24. O estado do bloco fonte da chave3 (código 24) é energizado. Nova simulação é solicitada para o módulo Simulador de Manobra, para a configuração de rede ilustrada na Figura 13.

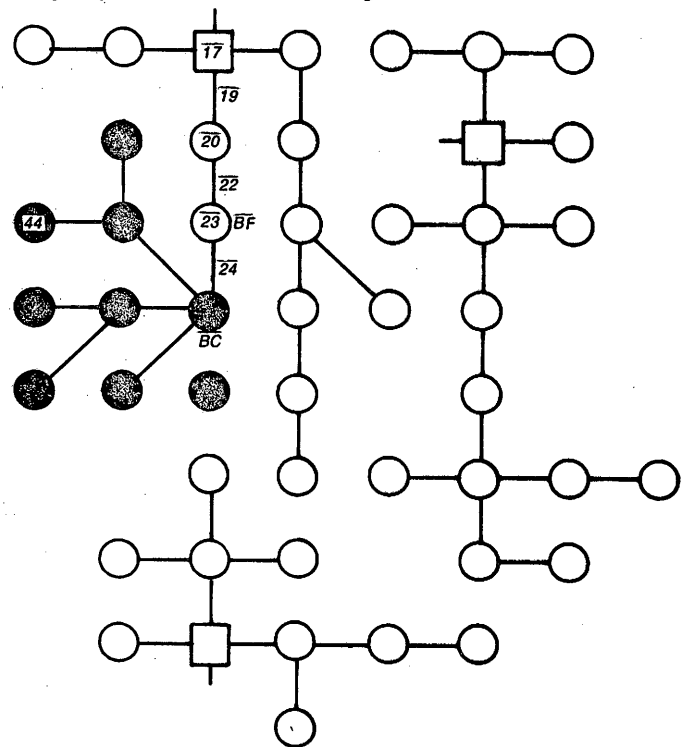


Figura 13. Simulação da chave 24.

Os resultados obtidos da simulação são:

1. Avalia a capacidade da Subestação suprir a carga.

Capacidade da SE[17]: 25.00 MVA

Carga a suprir: 11.88 MVA

2. Verifica a capacidade da chave.

Capacidade da chave 29: 400.00 A

Fluxo a suprir: 209.43 A

3. Verifica a queda de tensão no bloco fonte.

Limite de queda de tensão: 690.00 V

Queda de tensão no BF: 565.33 V

4. Verifica a queda de tensão no bloco carga.

Limite de queda de tensão: 690.00 V

Queda de tensão no BC: 650.89 V

Nesta simulação nenhum dos limites pré-estabelecidos foi ultrapassado. Conseqüentemente, a manobra é aconselhável e a enumeração é encerrada com sucesso, isto é, o RD conclui o Plano de Manobra:

Plano de Manobra

Manobras para isolar o bloco com defeito

Abrir	chave 32
Abrir	chave 39
Fechar	chave 32
Abrir	chave 40

Manobra para restabelecer a área escura

Fechar	chave 24
--------	----------

A Figura 14 ilustra a configuração da rede em operação após aplicação do plano de manobra apresentado acima.

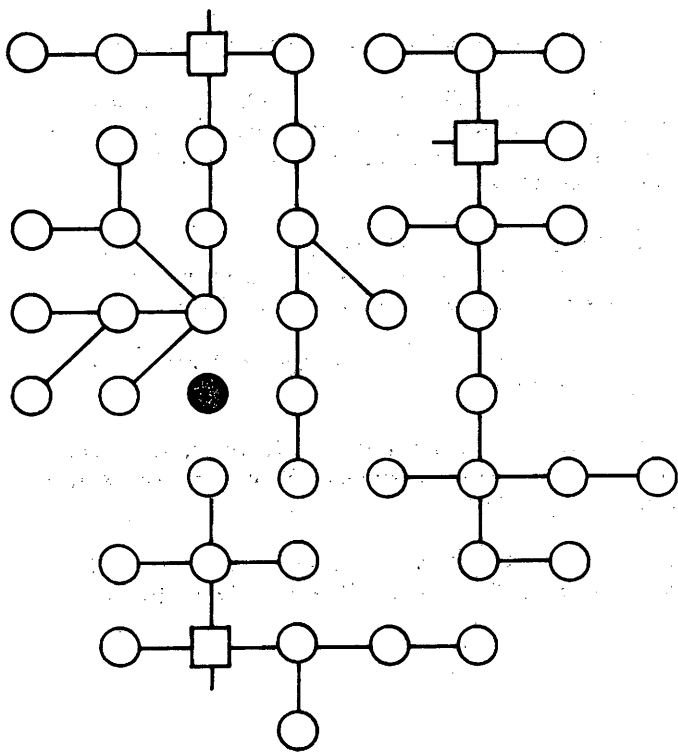


Figura 14. Rede em operação após aplicação do Plano de Manobra.

7. CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

O sistema baseado em conhecimento RD, descrito neste trabalho, foi desenvolvido para auxiliar o operador de rede na execução de planos de manobras emergenciais ou programadas em redes de distribuição de energia elétrica. Este sistema sugere manobras baseadas no conhecimento armazenado e em avaliações de capacidades de corrente e quedas de tensão nos elementos que compõem a rede.

A primeira versão do sistema RD, considerada protótipo, foi desenvolvido para microcomputadores compatíveis com IBM PC/XT. Ele integra módulos básicos de um sistema especialista (base de conhecimento, máquina de inferência e base de dados global), implementados em Turbo Prolog 1.1., com módulos de computação numérica (gerenciador de rede e simulador de manobra), implementados em Turbo C 1.5. Esta integração apresenta uma arquitetura versátil para inclusões e/ou alterações de funções no sistema.

A máquina de inferência implementada no RD foi baseada nos conceitos do sistema especialista MYCIN (Buchanan, B.G. e Shortliffe, E.H., 1985) e num desenvolvimento de idéias propostas por Sakaguchi e Matsumoto (1983) para restauração de sistemas de potência. A estratégia de inferência usada no RD é do tipo "SE a premissa é verdadeira ENTÃO execute a ação" (Modus Ponens). O controle de inferência é dirigido por metas ("backward chaining") e seu raciocínio é monotônico.

O algoritmo para simulação de manobras é baseado no Método dos Momentos, conveniente por sua simplicidade. Os resultados obtidos no cálculo das quedas de tensão ao longo do alimentador são adequados para redes radiais de distribuição de energia elétrica. Este algoritmo tem a particularidade de utilizar conceitos de grafos no armazenamento e tratamento dos dados físicos e elétricos da rede. Conseqüentemente, o cálculo da queda de tensão nos blocos da rede, devido a uma alteração na carga, apresentou resultados computacionais extremamente eficientes.

Atualmente, a base de conhecimento do RD tem 13 (treze) regras básicas, o equivalente ao conhecimento de um operador com pouca experiência prática. A aquisição do conhecimento adicional de

especialistas se dará, numa primeira fase, durante o desenvolvimento de um projeto piloto, a ser implantado em um dos 144 Centros de Operação da Distribuição da Companhia Paulista de Força e Luz - CPFL (em discussão no momento da redação deste trabalho).

AGRADECIMENTO

Este trabalho contou com o apoio do CNPQ - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

REFERÊNCIAS

- BRADLEY, G.W. & BROWN, G.G. & GRAVES, G.W. (1977), Design and Implementation of Large Scale Primal Transhipment Algorithms - Management Science, Vol. 24, # 1, pp. 1-34.
- BUCHANAN, B.G. & SHORTLIFE, E.H. (1985), Rule-based expert system. The Mycin Experiments of the Stanford Heuristic Programming Project. Addison-Wesley, USA, 1985.
- CASTRO, C.H. & BUNCH, J.B. & TOPKA, T.M. (1980), Generalized Algorithms for Distribution Feeder Deployment and Sectionalizing. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, N° 2, March/April. pp. 549-557.
- CASTRO Jr., C.A. (1985), Reconfiguração Automática de Redes de Distribuição de Energia Elétrica. Tese de Mestrado apresentada à FEC/UNICAMP, Setembro.
- CAVELLUCCI, C. (1988), Inteligência Artificial e suas Aplicações em Sistemas de Potência. Relatório Técnico CPFL/Dpto. Informática, Agosto.
- CAVELLUCCI, C. (1989), Sistema Especialista em Manobras de Redes de Distribuição de Energia Elétrica. Tese de Mestrado apresentada à FEE/UNICAMP, Abril.
- CHENG, S.J. & MALIK, O.P. & HOPE, G.S. (1988), An Expert System for Voltage and Reactive Power Control of a Power System. IEEE Transactions on Power System, Vol. 3, N° 4, November, pp. 1449-1455.
- FUJIWARA, R. & SAKAGUCHI, T. & KOHNO, Y. & SUZUKI, H. (1985), An Intelligent Load Flow Engine for Power System Planning. IEEE PICA, pp. 236-241.
- GONEN, T. (1986), Electric Power Distribution System Engineering. McGraw-Hill, USA.
- HARMON, P. & KING, D. (1985), Expert System. Artificial Intelligence in Business. John Wiley & Sons, USA.
- HARRIS, M.E.R. (1987), Algoritmo para Reconfigurar Redes Elétricas de Distribuição Usando Abordagem de Otimização Combinatória. Tese de mestrado apresentada à FEE/Unicamp, Dezembro.
- JENSEN, P.A. & BARNES, J.W. (1980), Network Flow Programming. John Wiley & Sons, USA.
- KASATKIN, A. & PEREKALIN, N. (1970), Basic Electrical Engineering. Mir Publishers, Moscow.
- KENNINGTON, J.L. & HELGASON, R.V. (1980), Algorithms for Network Programming. John Wiley & Sons, USA.
- KERONEM, J.J. (1989), An Expert System Prototype for Event Diagnosis and Real-Time Operation Planning in Power System

- Control. IEEE Transaction on Power Systems, Vol. PWSR-1, N° 2, May, pp. 544-550.
- LIU, C-C. & LEE, S.J. & VENKATA, S.S. (1988), An Expert System Operational Aid for Restauration and Loss Reduction of Distribution System. IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 3, N° 2, May, pp. 619-625.
- MARCELIC, P. (1957), *Lineas y Redes Eléctricas*. Ediar, Argentina.
- MORELATO, A.L. & MONTICELLI, A. (1989), Heuristic Search Approach to Distribution System Restoration. WM 111-6 PWRD.
- NILSSON, N.J. (1982), *Principles of Artificial Intelligence*. Springer-Verlag.
- RAHMAN, S. & BHATNAGAR (1988), An Expert System Based Algorithm for Short Term Load Forecast. IEEE Transaction on PowerSystem, Vol. 3, N° 2, May, pp. 392-399.
- RICH, E. (1983), *Artificial Intelligence*. McGraw-Hill, USA.
- SAKAGUCHI, T. & MATSUMOTO, K. (1983), Development of Knowledge Based System for Power System Restoration. IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol. PAS-103, # 2, February, pp. 320-329.
- TALAKUDAR, S.N. & CARDOZO, E. & PERRY, T. The Operator's Assistant - An Intelligent, Expandable Program for Power System Trouble Analysis. IEEE PICA 85, pp. 255-260.
- WINSTON, P.H. (1984), *Artificial Intelligence*, 2ª edition. Addison-Wesley, USA, 1984.
- WOLLENBERG, B.F. & SAKAGUCHI, T. (1987), Artificial Intelligence in Power System Operations. Proceedings of the IEEE, December, pp. 1678-1685.
- WOLLENBERG, B.F. Feasibility Study for an Energy Management System Intelligent Alarm Processor. IEEE PICA 85. pp. 249-254.