



UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

ALGORITMO PARA RECONFIGURAR REDES ELÉTRICAS DE
DISTRIBUIÇÃO USANDO ABORDAGEM DE OTIMIZAÇÃO
COMBINATÓRIA

MANUEL ENRIQUE RODRÍGUEZ HARRIS

Orientador:

Dr. André Luiz Morelato França

Redação final.

Em 06/jan/88.

Manuel

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica/UNICAMP, como parte dos requisitos exigidos, para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Dezembro 1987

T/UNICAMP
R618a

9141

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL



**A Elisa,
pelo seu sacrifício
e compreensão.**



UNICAMP

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. André Luiz Morelato França pela sua dedicada orientação e contínuo incentivo no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Departamento de Sistemas de Energia Elétrica da FEE, em particular ao prof. Dr. Alcir J. Monticelli, pelas suas sugestões e acolhida.

À Faculdade de Engenharia Elétrica da UNICAMP pela oportunidade de obter esta pós-graduação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, (CNPq), pelo seu apoio financeiro.



ÍNDICE

CAPÍTULO 1

| | |
|-----------------|------|
| INTRODUÇÃO..... | 1.01 |
|-----------------|------|

CAPÍTULO 2

| | |
|---------------------------------------------------------|------|
| OPERAÇÃO AUTOMÁTICA DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO..... | 2.01 |
| 2.1. Introdução..... | 2.01 |
| 2.2. O Sistema de Distribuição de Energia Elétrica..... | 2.01 |
| 2.3. O Sistema Primário de Distribuição..... | 2.04 |
| 2.4. Automação dos Sistemas de Distribuição..... | 2.09 |
| 2.5. Configuração Básica de Sistemas Automatizados..... | 2.11 |
| 2.6. A Operação de Sistemas Automatizados..... | 2.13 |
| 2.7. O Problema da Reconfiguração..... | 2.15 |
| 2.8. Medidas de Balanceamento..... | 2.20 |

CAPÍTULO 3

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| RECONFIGURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO COMO UM PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO COMBINATÓRIA..... | 3.01 |
| 3.1. Introdução..... | 3.01 |
| 3.2. Formulação Combinatória..... | 3.01 |
| 3.3. Organização do Espaço de Estados..... | 3.07 |
| 3.4. Estratégias de Solução..... | 3.12 |



CAPÍTULO 4

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ALGORITMO BASEADO NA PROGRAMAÇÃO HEURÍSTICA E NA TEORIA DE DECISÕES PARA RECONFIGURAR REDES DE DISTRIBUIÇÃO..... | 4.01 |
| 4.1. Introdução..... | 4.01 |
| 4.2. Estratégia Geral de Solução..... | 4.01 |
| 4.2.1. Estratégia Geral da Fase 1..... | 4.03 |
| 4.2.1. Estratégia Geral da Fase 2..... | 4.04 |
| 4.3. Estratégias Específicas..... | 4.05 |
| 4.3.1. Condições de Contorno do Vetor de Decisões..... | 4.05 |
| 4.3.2. Obtenção da Primeira Solução Viável... | 4.06 |
| 4.3.3. Ordenamento das Chaves a Declarar.... | 4.11 |
| 4.3.4. Teste de Viabilidade..... | 4.14 |
| 4.3.5. Novas Soluções Viáveis..... | 4.17 |
| 4.3.6. Controle de Afastamentos..... | 4.22 |
| 4.3.7. Procedimentos da Fase 2..... | 4.25 |
| 4.4. Simulação Didática..... | 4.27 |

CAPÍTULO 5

| | |
|------------------------------------|------|
| IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA..... | 5.01 |
| 5.1. Introdução..... | 5.01 |
| 5.2. Implementação..... | 5.01 |
| 5.2.1. A Linguagem..... | 5.02 |
| 5.2.2. Descrição do Programa..... | 5.04 |
| 5.2.3. Etapa Diagnosticadora..... | 5.09 |
| 5.3. Teste de Resultados..... | 5.11 |
| 5.3.1. Organização dos Testes..... | 5.11 |



5.3.2. Resumo dos Resultados.....5.22

CAPITULO 6

COMENTÁRIOS FINAIS E CONCLUSÕES.....6.01

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....R.01



CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A automação dos sistemas de distribuição de energia elétrica coloca em evidência novos problemas de operação e controle do sistema. Um desses problemas refere-se ao restabelecimento automático de energia aos consumidores após a ocorrência de defeltos permanentes. Outro consiste na transferência automática de carga entre alimentadores, visando obter pontos de operação mais atraentes. Em ambos os casos é necessário saber como reconfigurar a rede da melhor maneira possível.

Este problema tem sido enfrentado pelos operadores de sistemas de distribuição com pouca automação na base da tentativa e erro utilizando regras operativas extraídas da sua experiência e conhecimento do problema. Encontrada uma solução o operador dá-se por satisfeito.

Quando cresce o nível de automação a flexibilidade da operação aumenta exigindo também que os procedimentos da reconfiguração sejam automatizados.

O problema da reconfiguração automática tem sido

abordado através de algoritmos heurísticos [2] ou sistemas baseados no conhecimento [4] que mantém a característica principal do procedimento manual, ou seja, satisfaz-se com a primeira solução encontrada.

Este trabalho propõe o desenvolvimento de um método baseado em programação heurística que incorpora o procedimento básico usado por um operador experiente mas que busca a melhor solução para o problema de reconfiguração sem varrer todas as alternativas possíveis. Por melhor solução entende-se aquela que melhor atende aos índices de qualidade propostos.

O trabalho está organizado como segue:

No capítulo 2 são descritos os aspectos gerais da automação da distribuição de energia elétrica e a definição do problema de reconfiguração.

No capítulo 3 a reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica é formulada como um problema de otimização combinatória e define-se o ambiente em que deve ser desenvolvida a busca da melhor solução.

O capítulo 4 é destinado à apresentação do algoritmo que está-se propondo neste trabalho. A apresentação é completada com uma simulação didática.



No capítulo 5 é descrito o programa que implementa o algoritmo e são mostrados os resultados dos testes aplicados a redes com diferentes estruturas topológicas e situações de carga.

O capítulo 6 destina-se aos comentários finais e conclusões sobre o trabalho.

No fim do texto são listadas as referências bibliográficas.



CAPÍTULO 2

OPERAÇÃO AUTOMÁTICA DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO

2.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo realiza-se uma revisão das características principais dos sistemas primários de distribuição, descrevendo a operação automatizada dos Centros de Operação da Distribuição; além disso, é feita a apresentação elétrica do problema da reconfiguração.

2.2. O SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Os sistemas de energia elétrica têm por objetivo fundamental a geração, transmissão e distribuição da energia com a melhor qualidade a um custo mínimo. Este sistema é dividido em subsistemas de geração, transmissão e distribuição elétrica. O subsistema de distribuição se caracteriza por manipular volumes de energia bem menores que os outros dois, porém, sendo responsável direto pelo fornecimento a inúmeros pontos de consumo, possui uma extensa rede elétrica.



A Figura 2.1 mostra a estrutura básica de um sistema de energia elétrica onde se destaca o subsistema de distribuição. O subsistema de distribuição, que de agora em diante será chamado só sistema de distribuição, é subdividido em rede primária e rede secundária. A rede primária é constituída por alimentadores que saem das subestações de distribuição e transportam energia até postos de transformação para a rede secundária. Esta última entrega a energia ao consumidor final sendo que alguns consumidores de maior porte podem ser conectados diretamente na rede primária. Atualmente são permitidas tensões de até 600 V na rede secundária e de 600 V a 34,5 KV na rede primária.

A operação e controle dos subsistemas de geração-transmissão e distribuição é feita através de centros de controle específicos. Frequentemente os centros de controle de transmissão e distribuição não possuem comunicação direta entre si.

Atualmente a atuação dos Centros de Operação da Distribuição (COD) é bastante limitada e depende quase exclusivamente da experiência do operador do sistema. O operador não dispõe de recursos de telemedição, processamento e telecontrole que auxiliem suas tomadas de decisão.

A necessidade de se modernizar a operação de

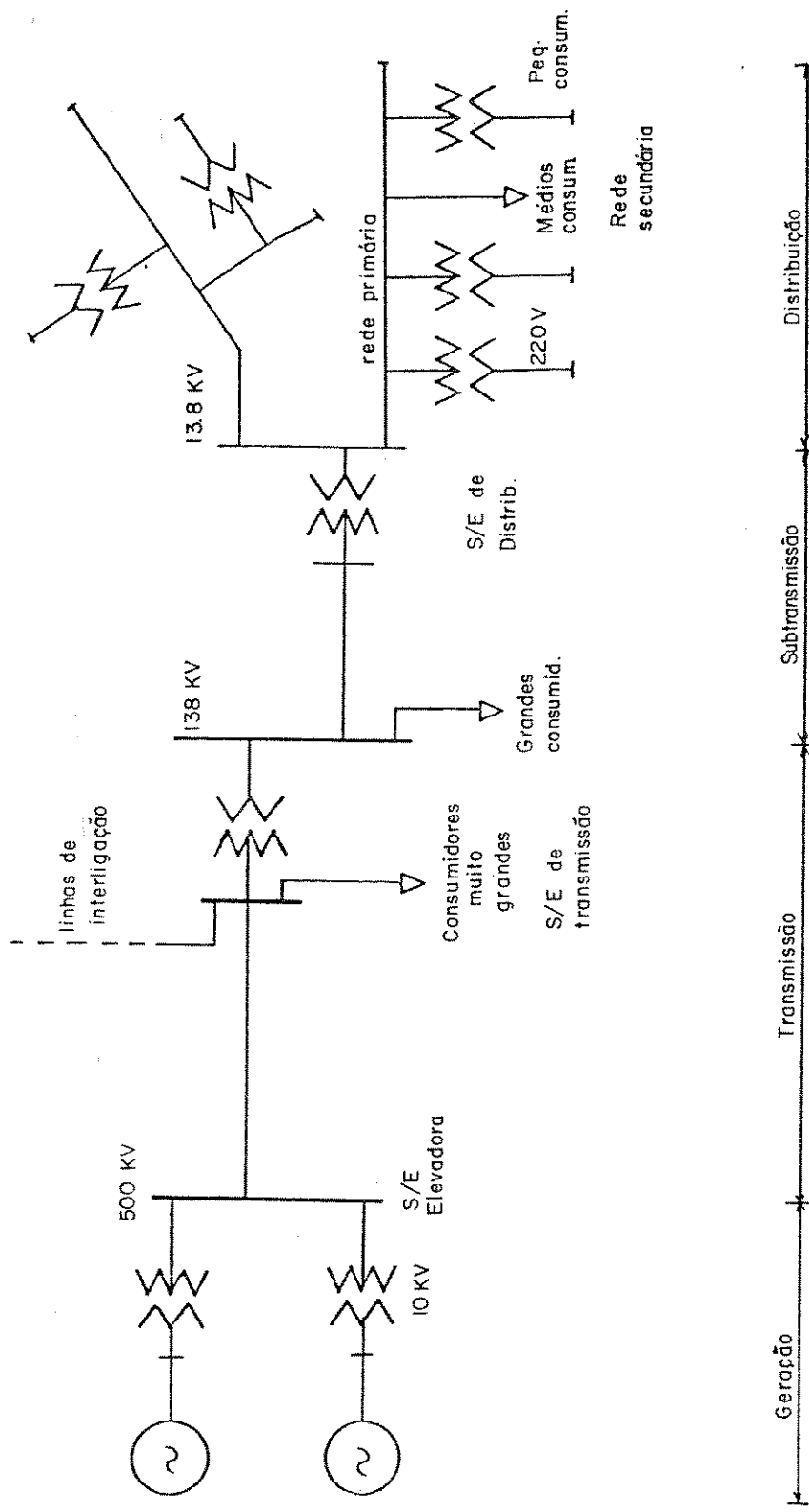


Figura 2.1.: Estrutura básica de um Sistema Elétrico



sistemas de distribuição não se justifica somente pelo requerimento de melhor confiabilidade e qualidade no fornecimento, através da instalação de sistemas de supervisão e controle computarizados. A tendência é a operação tornar-se cada vez mais complicada exigindo mecanismos de controle mais precisos [20,15] para fazer face às novas necessidades de gerenciamento energético do lado da oferta quanto do lado da demanda. Neste aspecto são importantes:

- * a introdução da co-geração e de pequenas usinas hidrelétricas diretamente nos sistemas de distribuição,

- * execução de programas de conservação de energia através de manobras instantâneas que remanejem cargas em subestações e/ou alimentadores visando redução de perdas,

- * implementação efetiva de sistemas tarifários diferenciados,

- * utilização ótima dos equipamentos instalados permitindo o adiamento de futuros investimentos.

2.3 O SISTEMA PRIMÁRIO DE DISTRIBUIÇÃO

Já que o Sistema Primário de Distribuição (SPD) será o centro de atenção do presente trabalho, abordar-se-ão algumas de suas características.

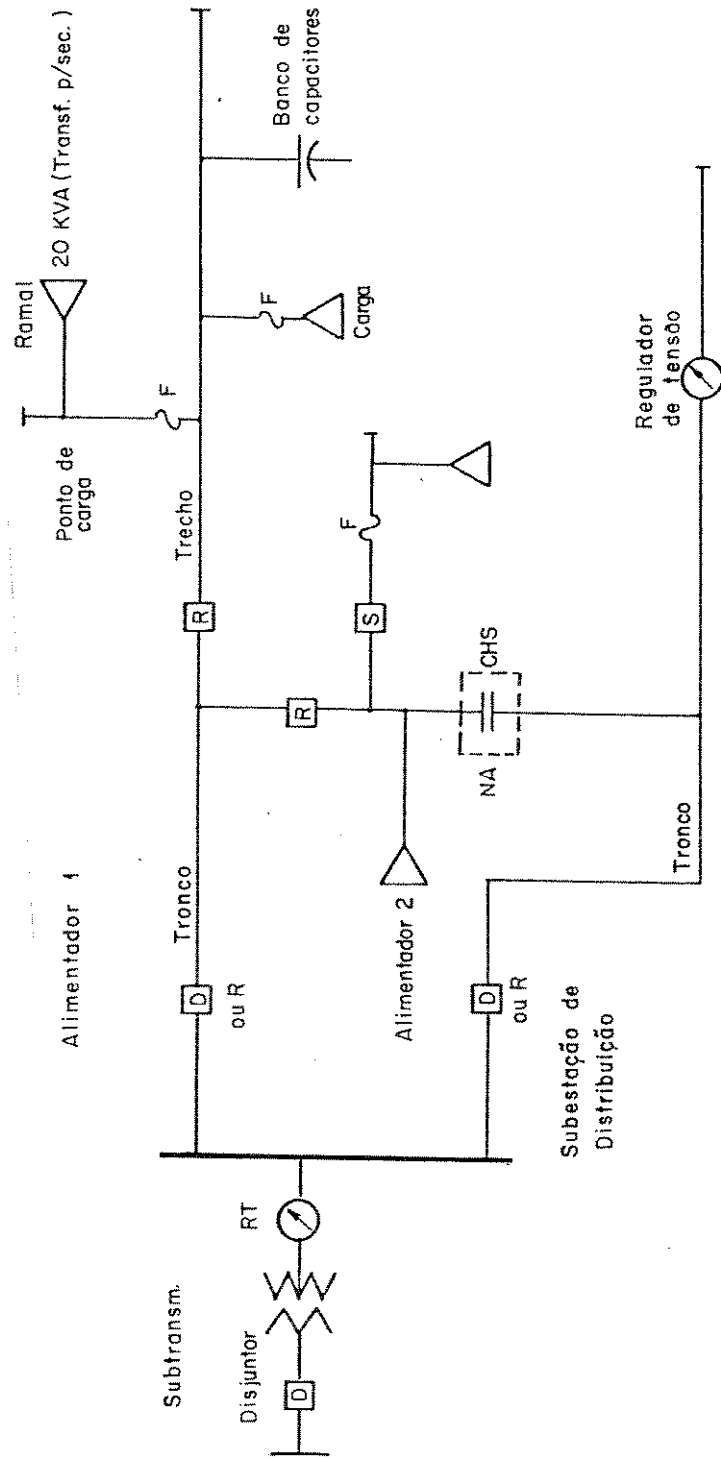


Fig. 2.2.: Componentes principais de um Sistema Primário de Distribuição.

O SPD consiste em um conjunto de alimentadores (linhas aéreas ou cabos subterrâneos) que saindo das subestações de distribuição levam a energia elétrica através de regiões urbanas e rurais. Os níveis de tensão geralmente utilizados no Brasil situam-se na classe de 15 KV e 23 KV.

Os principais componentes e a configuração usual de um SPD são mostrados na Figura 2.2. As entidades que ali aparecem, são:

| | |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------|
| ALIMENTADOR | parte da rede ligada diretamente à subestação por um disjuntor; |
| TRONCO | parte do alimentador com maior capacidade de corrente; |
| RAMAL | derivação de menor capacidade do alimentador; |
| TRECHO | secção de linha entre dois pontos importantes; |
| PONTO DE CARGA | interligação com a rede secundária ou cabine de consumidor em alta tensão. |

Na Figura 2.2 também são mostrados os principais equipamentos que, usualmente, constituem uma rede de distribuição primária hoje em dia. Eles são:

Equipamentos de Proteção:

D disjuntor comandado por relé ou religador; protege a

subestação de defeitos no alimentador correspondente;

- R religador automático; protege trechos importantes sujeitos a faltas temporárias;
- S seccionador automático; protege os ramais atuando em coordenação com os religadores;
- F fusível; protege os ramais e pontos de carga.

Equipamentos de Manobra:

CHS chave seccionadora; permite o desligamento de trechos para manutenção e permite mudar a configuração da rede energizando trechos por diferentes caminhos através da interligação com outros alimentadores ou subestações.

Equipamentos de controle de Tensão:

- RT regulador de tensão por ajuste de "tap"; usado para evitar quedas acentuadas de tensão em alimentadores longos ou controlar a tensão na saída da subestação;
- BC banco de capacitores; usado para sustentar a tensão localmente.

Os SPD, especialmente os de maior porte, são operados através do Centro de Operação da Distribuição, que em termos gerais, tem as seguintes responsabilidades:

- a) manter a continuidade do fornecimento a todos os consumidores, providenciando a manutenção preventiva e corretiva;



UNICAMP

b) zelar pela qualidade do fornecimento de energia elétrica mantendo os níveis de tensão dentro da faixa especificada; a frequência é controlada pelo sistema de geração/transmissão e portanto o COD não atua; e para os problemas causados por harmônicos e "flicker" o COD não tem ação, por enquanto;

c) planejar e realizar as manobras necessárias;

d) operar o sistema sem sobrecarregar os equipamentos da rede;

e) registrar todos os eventos ocorridos na rede sob sua responsabilidade.

O operador de um COD dispõe, hoje em dia, dos seguintes recursos para realizar sua tarefa:

a) Em termos de coleta de dados e informações:

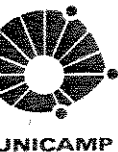
- telefone (recebe comunicações de falta de energia);
- cadastro de consumidores;
- banco de dados da rede.

b) Em termos de processamento das informações:

- experiência do operador;
- painel mímico (em sistema de porte médio).

c) Em termos de controle:

- telefone;
- rádio;



- equipe de eletricitistas para manutenção.

2.4. AUTOMAÇÃO DOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Atualmente a operação dos sistemas de distribuição de energia elétrica realiza-se de forma pouco satisfatória. Os recursos que, normalmente, são colocados à disposição do operador para desempenhar sua tarefa são escassos e, às vezes, inadequados. As informações que permitem ao operador saber o que está acontecendo na rede são demoradas, pouco confiáveis e bastante restritas. O tempo de acesso ao banco de dados da rede é muito grande, dificultando e retardando a tomada de decisões. Raramente o operador dispõe de outros recursos, que não sua experiência, para processar as informações recebidas. Por outro lado, sua ação de controle direta sobre as condições de operação da rede são limitadas, praticamente ela se restringe a comandar as equipes de eletricitistas que cuidam da manutenção e realizam as manobras.

Esses problemas operativos tendem a se agravar quando se pensa na co-geração, PCH's, e controle de tarifação horo-sazonal. A progressiva automação tem se revelado uma estratégia adequada para enfrentar estes problemas.

Automatizar a operação dos sistemas primários de distribuição significa utilizar tecnologias modernas de telecomunicações, de computação e de controle de processos com o objetivo de:

a) fornecer ao COD informações amplas, confiáveis e em tempo real;

b) instrumentar o COD com recursos computacionais de análise das informações que sejam eficientes e confiáveis;

c) permitir ao COD ações de controle mais abrangentes e de comando remoto (telecontrole).

Neste sentido é necessário colocar à disposição do operador alguns recursos mínimos em termos de telemedição, processamento das informações e telecontrole:

a) um sistema de aquisição de dados controlados por computador capaz de coletar, periodicamente, informações sobre as condições de operação da rede, organizá-las convenientemente e apresentá-las ao operador através de interfaces homem-máquina (video, por exemplo);

b) programas computacionais de análise capazes de, rodando em tempo real ou "off-line", executar funções de controle de modo a auxiliar o operador em suas tomadas de decisão e planejamento da operação;

c) dispositivos telecontrolados (chaves seccionadoras, por exemplo) capazes de alterar a configuração ou condições de operação da rede de modo a implementar, rapidamente, as decisões de controle do operador.

2.5. CONFIGURAÇÃO BÁSICA DE SISTEMAS AUTOMATIZADOS

Sob o ponto de vista de automação e controle, as redes de distribuição primária devem ser divididas em zonas interconectadas por chaves seccionadoras. Uma zona corresponde a uma parte da rede elétrica constituída por vários trechos e pontos de carga. Uma zona se liga a outras zonas através de chaves ou disjuntores. As chaves seccionadoras e disjuntores devem ser motorizados permitindo comando remoto de abertura e fechamento sob carga.

Na Figura 2.3 mostram-se os principais componentes e a configuração básica de um sistema automatizado de distribuição.

A Figura 2.3 indica que a automação de uma rede de distribuição envolve, pelo menos:

a) um sistema de aquisição de dados controlado por microprocessador que coleta informações da rede através de transdutores (TR) e fornece-as ao operador através de

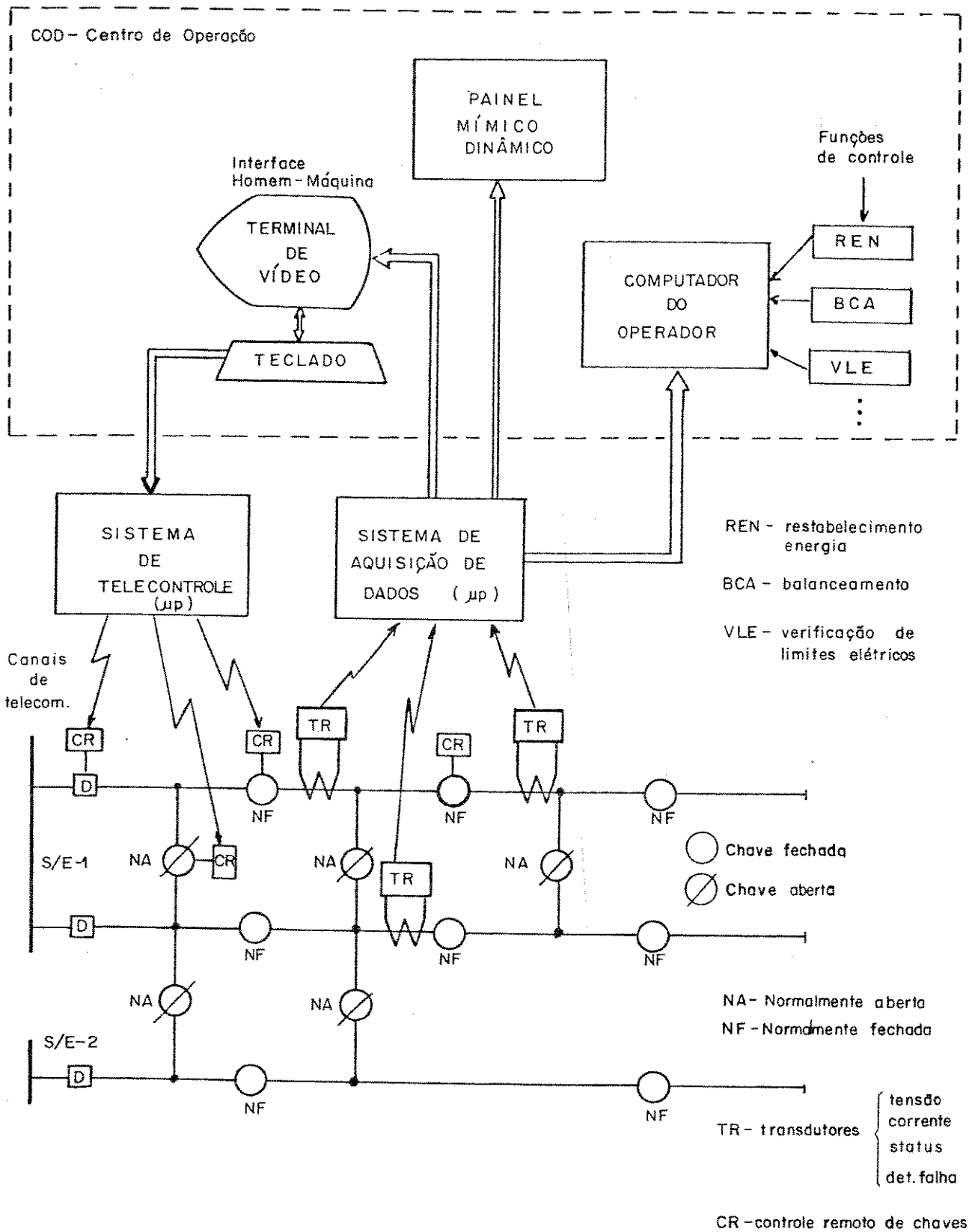


Fig. 2.3.: Configuração básica de um Sistema Automatizado de Distribuição

terminal de vídeo, impressora ou painel mímico dinâmico e, eventualmente, atualiza os dados de entrada no computador do operador; as medidas usualmente feitas são tensão, corrente, "status" de chave e ocorrência de falta (detector de falta):

b) facilidades de visualização e processamento das informações adquiridas da rede, através de ferramentas computacionais adequadas capazes de executar funções de controle e simulações que auxiliem o operador na tomada de decisões;

c) um sistema de telecontrole operado por microprocessador que recebe comandos do operador e implementa-os na rede através de dispositivos de controle remoto apropriados (CR); o tipo de comando mais comum se refere à abertura e fechamento das chaves seccionadoras e disjuntores, mas chaveamento de banco de capacitores e ajuste de reguladores de tensão também pode ser incluído.

2.6. A OPERAÇÃO DE SISTEMAS AUTOMATIZADOS

A automatização dos Sistemas de Distribuição Primário traz embutido novos problemas de operação e controle do sistema, antes não cogitados por falta de recursos tecnológicos apropriados. Descritos em termos gerais, alguns destes problemas [10,11,12,13,14,17,18], são:



1) Detecção, localização e isolamento de áreas defeituosas;

2) Restauração de energia nas seções não defeituosas;

3) Transferência de carga: reconfiguração dos alimentadores procurando um melhor balanceamento de carga.

4) Controle de reativos : minimização das perdas provocadas pelo fluxo de potência reativa e melhoramento do perfil de tensão;

5) Alocação ótima de carga em estado normal: minimização de perdas pelo fluxo de potencia ativa na rede sob operação normal.

Alguns dos problemas referidos anteriormente (que correspondem às funções de controle do COD), necessariamente devem ser resolvidos em tempo-real (como o caso da detecção e localização de defeitos), e outros podem sê-lo "off-line", i.e., apenas como uma ferramenta de simulação que o operador usa em suas tomadas de decisão.

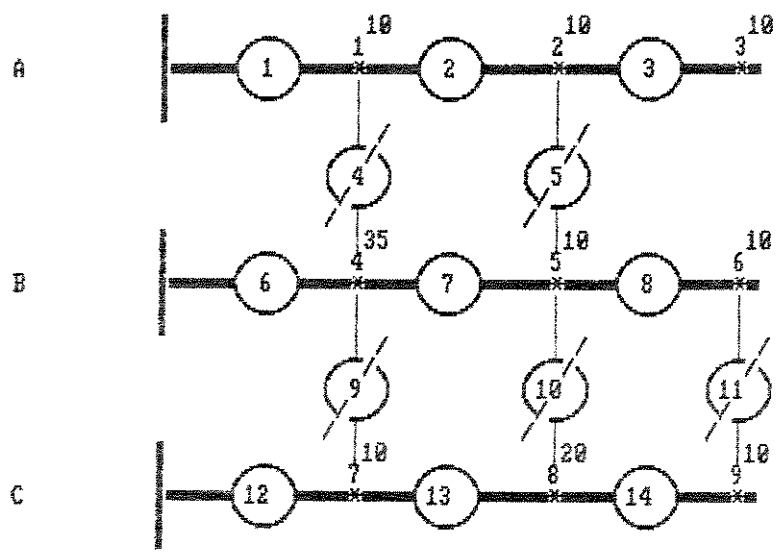
O desenvolvimento de novas funções de controle, que correspondem ao "software" aplicativo de alto nível necessário para operar um centro de controle automatizado, torna-se condição indispensável para uma utilização mais efetiva dos sistemas de supervisão. Este será o tema deste trabalho.

2.7. O PROBLEMA DA RECONFIGURAÇÃO

Quando em alguma zona (ou em mais de uma) do Sistema de Distribuição ocorre uma falha permanente, a ação dos disjuntores (ou religadores) isolarão o alimentador envolvido, colocando a rede em operação de emergência.

Para levar o sistema novamente a um estado de operação normal é preciso que sejam executadas determinadas funções de controle. Primeiro, deverá ser detectada e localizada a zona onde ocorreu o defeito, e em seguida, realizar os chaveamentos que permitam isolá-la do resto da rede. O seguinte passo será religar, se for possível, os disjuntores (ou religadores) do alimentador comprometido já que se a falha é no início do alimentador, seu religamento forneceria energia ao defeito. Nestas condições o sistema atinge o estado de restauração.

Considerando que normalmente o sistema primário de distribuição opera sob uma estrutura radial [4,9,18], o isolamento da falha pode deixar sem energia regiões não defeituosas, embora seja restabelecido o suprimento no alimentador em falta. Como ilustração, considerar a rede da Figura 2.4, supondo que ocorre um defeito permanente na Zona 5; depois de terem sido abertas as chaves 7 e 8 e



Comentários:



- $\frac{10}{5}$
* zona Z5, carga 10
-  chave CH6 fechada
-  chave CH9 aberta

Figura 2.4.: Rede exemplo.

reiligado o disjuntor 6, a Zona 6 permanece escura. Se o defeito acontecer na zona Z4, o alimentador não poderá ser reiligado.

O problema de reconfiguração consiste em determinar uma lista ordenada de chaveamentos (chaves que devem ser abertas e fechadas) que permitam iluminar o máximo número de zonas escuras, distribuindo-as pelos alimentadores ativos de modo a obter o melhor balanceamento possível e atendendo às restrições operativas.

No exemplo apresentado, mesmo tendo sido reiligado o alimentador defeituoso através do disjuntor 6, ficou sem energia a Zona 6. Para iluminar a zona escura devem ser levadas em conta todas as chaves que a interligam com as zonas vizinhas (iluminadas ou não). Sendo várias as chaves associadas a uma área, nem todas permitem colocar a zona escura nos alimentadores ativos. Algumas poderão comprometer o desempenho da rede, ou simplesmente não atingir um alimentador ativo.

Em uma rede real são muitas as zonas que poderão ficar escuras, de modo que o número de alternativas de chaveamentos aumenta consideravelmente. A solução deverá corresponder à melhor sequência de chaveamentos visando minimizar o número de operações de chaves e de iluminar o maior número de zonas escuras. Esta solução pode ser obtida formulando a reconfiguração como um problema de otimização

combinatória.

As restrições que a solução deve obedecer são as regras operativas usuais do sistema primário de distribuição:

a) a rede deverá manter uma estrutura de operação radial, ou seja, não serão permitidos "loops" ou anéis,

b) não deverão ser gerados circuitos inconexos, isto é, circuitos desenergizados,

c) respeitar os limites elétricos de operação, ou seja, tensão dentro da faixa de +5% a -7.5% e corrente não ultrapassando limites térmicos máximos.

Outras regras específicas de cada sistema podem ser incluídas como restrições, mas pelo menos as restrições citadas acima devem ser levadas em conta.

A implementação da solução implica no conhecimento da sequência de chaveamentos que devem ser executadas a fim de obter o novo estado sem que os estados de transição conduzam a um desempenho da rede que viole as regras de operação.

O problema de controle do restabelecimento do energia, diferente dos casos de problemas de fluxo de carga e de estabilidade, por exemplo, não é de fácil formulação em

um padrão analítico [3]. O método de solução deve ter uma capacidade de tratar com a natureza combinatória do problema, e não apenas cuidar das leis físicas senão também das leis que correspondem aos procedimentos operacionais da rede de distribuição.

O problema da reconfiguração tem sido abordado de duas formas diferentes. A primeira, que poder-se-ia chamar inteiramente heurística, desenvolve algoritmos que procuram reproduzir procedimentos humanos que um operador experiente usaria para resolver o problema [2]. Nesta abordagem, a realocação das zonas escuras é resolvida completamente orientada pela heurística o que não garante atingir a melhor solução (ótimo global).

A segunda, procura construir um sistema especialista com o conhecimento representado através de regras de produção [4]. Porém, a principal preocupação dessa proposta é resolver rapidamente o problema de realocação mais que em obter a melhor solução.

A questão deste trabalho é apresentar um método alternativo, no Capítulo 4, aos propostos na área de desenvolvimento de "software" aplicativo, para executar as funções de controle de localizar, isolar e reconfigurar uma rede de distribuição primária após acontecida uma falha. O algoritmo apresentado resolve o problema da reconfiguração

procurando, orientadamente em uma árvore de decisões, todas as possíveis soluções garantindo que a solução seja a melhor.

2.8. MEDIDAS DE BALANCEAMENTO

A vantagem de se ter uma rede com cargas balanceadas entre os alimentadores está na utilização econômica dos equipamentos, menores perdas e a melhor preparação da rede para atender a eventuais situações de emergência.

O balanceamento pode ser medido através de um índice D [2], definido como a diferença entre as cargas dos alimentadores mais e menos carregados, i.e.,

$$D = ZOLD(I) - ZOLD(J)$$

onde:

$ZOLD$ é a carga acumulada das zonas;

I refere-se ao alimentador mais carregado;

J refere-se ao alimentador menos carregado.

A dificuldade com D é que ele não fornece boa resolução tornando difícil decidir entre duas situações qual a melhor.

Um índice mais discriminatório que pode ser usado baseia-se na medida estatística "desvio-padrão", cuja

expressão analítica é:

$$DP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

onde,

x_i carga do alimentador i ,

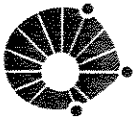
\bar{x} valor médio das cargas dos alimentadores,

n número de alimentadores.

O desvio-padrão por ser uma medida do desvio de todos os valores em relação a um valor médio parece ser um melhor índice para avaliar o balanceamento de carga. Isto pode ser verificado considerando-se a Tabela 2.1, na qual se apresentam diferentes distribuições de carga entre quatro alimentadores (AL11, AL12, AL13, AL14).

TABELA 2.1
MEDIDAS DE BALANCEAMENTO
(cargas em p.u.)

| CASO | ALIMENTADOR | | | | D | DP |
|--------|-------------|------|------|------|----|------|
| | AL11 | AL12 | AL13 | AL14 | | |
| CASO 1 | 10 | 20 | 40 | 50 | 40 | 15.8 |
| CASO 2 | 10 | 30 | 30 | 50 | 40 | 14.1 |
| CASO 3 | 10 | 10 | 50 | 50 | 40 | 20.0 |
| CASO 4 | 10 | 15 | 45 | 50 | 40 | 17.7 |



UNICAMP

No exemplo, todos os casos correspondem a uma carga total de 120 p.u. distribuídas nos quatro alimentadores, em diferentes formas. A avaliação do balanceamento mediante o índice D (40 em todos os casos), indica que os quatro casos são equivalentes enquanto que o índice DP discrimina os quatro casos.

CAPÍTULO 3

RECONFIGURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO COMO UM PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO COMBINATÓRIA

3.1. INTRODUÇÃO

No presente capítulo são expostas as características que permitem a formulação combinatória do problema da reconfiguração. Naquele contexto são apresentados os mecanismos de busca, que serão desenvolvidos neste trabalho, na procura da melhor solução.

3.2. FORMULAÇÃO COMBINATÓRIA

Como já foi visto, o isolamento da zona em falta pode trazer como consequência o aparecimento de regiões escuras. A questão que se coloca ao operador do COD é como reconfigurar a rede visando restabelecer o suprimento de energia elétrica ao maior número de zonas não iluminadas.

Sendo que a operação dos SPD é tipicamente radial os alimentadores primários são conetados a seus vizinhos através de chaves de interligação normalmente abertas [4];

esta filosofia é seguida a fim de aumentar a confiabilidade do sistema. Para implementar esta estrutura, às zonas de carga são associadas várias chaves seccionadoras. Nesta topologia uma zona de carga assemelha-se a uma verdadeira ilha, como mostra a Figura 3.1., delimitada por várias chaves que permitem interligá-la de diferentes maneiras e não apenas a um alimentador.

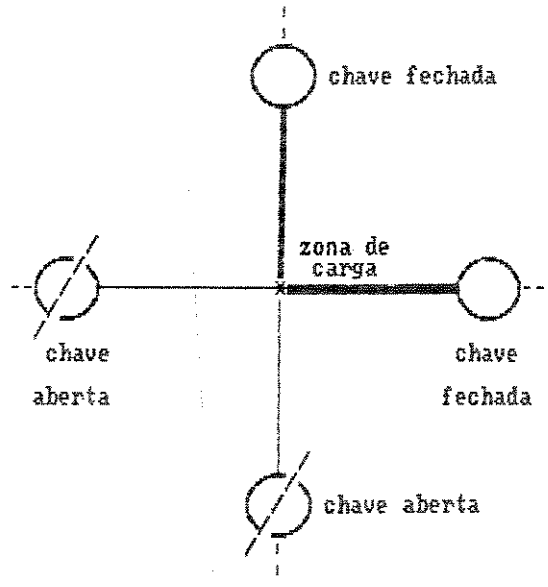


Figura 3.1.: Topologia de uma zona de carga.

Para religar uma zona de carga numa rede elétrica é necessário executar, em geral, uma série de operações de chaves. É assim que, em uma perspectiva mais ampla, resolver a questão do restabelecimento de energia devido a um defeito permanente resulta no problema de determinar um conjunto de chaveamentos que conetam zonas escuras aos alimentadores ativos. Evidentemente, o grau de dificuldade será maior quando o número de zonas por iluminar for grande e se a rede



tiver de atender as inúmeras restrições operacionais.

Em certos casos, a solução do problema poderá ser trivial, se o objetivo for apenas iluminar o maior número de zonas escuras. No entanto, numa rede elétrica devem ser mantidos os requerimentos de qualidade do fornecimento, de maneira que, além do objetivo de realocação, devem ser visados objetivos adicionais, por exemplo, redução das perdas, balanceamento de carga e fluxo de reativos.

Devido à estrutura topológica típica da rede primária de distribuição, existe mais de um chaveamento possível para ligar uma zona de carga. Se, por um lado, isto implica em realizar algum esforço na análise das alternativas, por outro, permite selecionar a melhor solução. Portanto, a procura de uma solução mais completa terá que levar em conta as muitas combinações de chaveamentos que conduzam a um estado elétrico operativo, e deverá fornecer uma sequência de chaveamentos que permita, em cada passo, atender às restrições operativas.

A natureza combinatória das alternativas dos chaveamentos e a qualidade da solução final esperada permitem caracterizar o problema da reconfiguração como um problema de otimização combinatória [16].

Nesse enfoque, a "melhor-solução" será encontrada

após a análise de todas as possíveis alternativas de chaveamentos que levem a rede desde seu estado inicial, imediatamente após isolado o defeito, ao novo estado normal com o máximo atendimento de carga procurando, por sua vez, o melhor desempenho da rede.

A melhor-solução corresponde a uma determinada condição de operação do SPD, que pode ser chamada "melhor estado final". A sua implementação prática conduz a novas questões. Desde um contexto mais geral, o problema da reconfiguração corresponde a um problema complexo que pode ser decomposto, em vários subproblemas:

- o problema básico de realocar o máximo de carga escura na rede ativa;

- o problema de distribuir adequadamente a carga nos alimentadores visando a obter o melhor balanceamento;

- o problema de determinar uma sequência viável de chaveamentos que permita ir desde o estado inicial ao estado final fornecido pela melhor-solução sem ferir nenhuma restrição operacional.

Mesmo estando em estado de restabelecimento, após isolado o defeito, o restante da rede continua em funcionamento. De todas as chaves que compõem a rede, haverá algumas abertas (como as que isolam o defeito e aquelas de interligação entre alimentadores), e outras



fechadas (como as que mantêm a condição de carga nas áreas iluminadas). O resto das chaves, que se ligam às zonas escuras, terão uma posição inicialmente indefinida devendo ser declaradas no percurso do processo de realocação.

Como estratégia global da definição do estado final das chaves pode ser adotado qualquer um dos seguintes critérios:

a) algumas chaves são consideradas não declaradas, por exemplo, apenas as associadas com zonas escuras;

b) todas as chaves são consideradas não-declaradas, isto é, excetuando-se as chaves que isolam o defeito, os estados de todas as restantes chaves podem ser alterados; isto significa que no processo de reconfiguração permite-se deslocar cargas atendidas (iluminadas) para outro alimentador.

Considerando que uma operação balanceada é desejável por deixar a rede em um estado mais seguro, o balanceamento de carga nos alimentadores deverá ser inserido no algoritmo de resolução, como parte do objetivo geral a ser atingido.

Numa formulação mais específica, no contexto dos problemas de otimização combinatória, deve-se definir o vetor de decisões x , que no caso do problema de reconfiguração de zonas escuras corresponde aos estados das



chaves na rede. Neste caso, o vetor de decisões será:

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$$

onde,

$$x_i \in S_i, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$S_i = \{ AB, FE \}$$

Considerando a abordagem de otimização combinatória a realocação das zonas escuras pode ser apresentado formalmente como um problema do tipo: "encontrar um vetor de decisões x que maximize uma função objetivo $P(x)$, atendendo a um conjunto de restrições" [22].

No problema em questão, o vetor de decisões x é aquele definido acima e a função objetivo $P(x)$, na verdade, se desdobra em duas partes:

- * maximizar o número de zonas escuras iluminadas,
- * minimizar o desbalanceamento de carga (medido pelo índice do desvio-padrão).

O vetor de decisões estará sujeito às seguintes restrições:

- * **operação radial:** o fechamento de uma chave não deverá ligar eletricamente duas zonas iluminadas, já que neste caso a manobra colocará dois alimentadores ativos em paralelo o que não será permitido pela operação da rede;

* rede conexa: como um caso particular de estrutura em anel está a formação de trajetórias fechadas entre zonas escuras. Qualquer operação de chaveamento que leve a formação deste tipo de estrutura, não será permitido;

* limites elétricos: visando manter os requisitos de qualidade do fornecimento de energia qualquer operação de chave deverá zelar pelo comportamento da rede em termos de suas características elétricas. Nos caso dos SPD os limites que interessa verificar são as tensões em cada ponto de carga e as correntes nos cabos dos condutores [23];

* outras restrições operativas específicas: poderão ser consideradas restrições tais como limitar a quantidade de zonas de carga colocadas nos alimentadores, ou impedir que o alimentador se torne fisicamente muito extenso, dificultando o trabalho de manutenção.

3.3. ORGANIZAÇÃO DO ESPAÇO DE ESTADOS

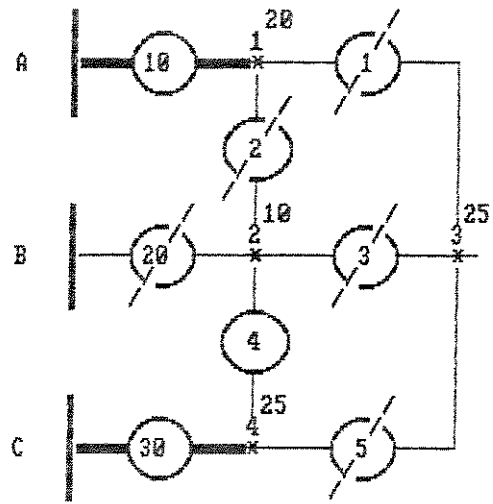
A simulação de cada operação de chave estabelece um estado de operação específico na rede já que muda a sua configuração topológica e o seu desempenho elétrico. A consideração de todos os possíveis chaveamentos que permitam ligar as zonas escuras gera o espaço de todos os estados da rede.

Como uma maneira de facilitar a resolução do problema de otimização combinatória, o espaço de estado é organizado através de "árvores de decisões" [22].

O uso de um determinado tipo de árvore dependerá de como será abordado o problema. Assim, quando é empregada a estratégia de ramificação ("branching") por chaves seccionadoras, torna-se natural organizar o espaço de estados em "árvore binária" [16] considerando que apenas são duas as ações possíveis em cada chave: abrir e fechar. Este tipo de expansão cobre todas as alternativas de configuração da rede.

A Figura 3.2.(b) mostra uma árvore binária onde são representadas todas as operações possíveis de chaves para ligar a zona Z3 na rede da Figura 3.2.(a), tomada como exemplo. As chaves CH2, CH3, CH4 e CH20 são declaradas previamente abertas e as demais são não-declaradas.

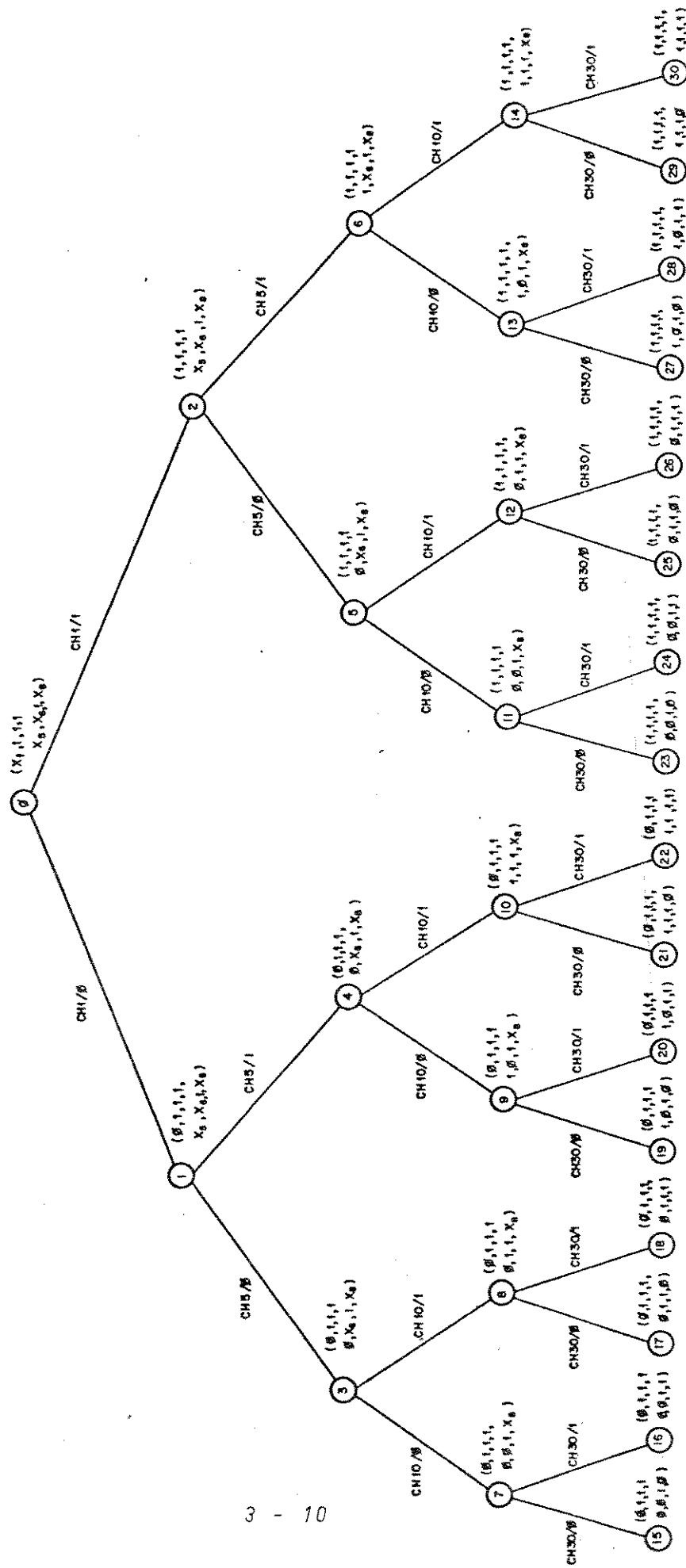
O nó "0" corresponde ao nó raiz. Os nós no fundo, 15 a 30, são chamados "nós-terminais" (folhas). Os restantes nós, chamados "nós-intermediários" (ou "nós-não-terminais"), são raízes das próximas subárvores. A expansão do nó raiz gera os seus sucessores. O nó raiz é pai dos sucessores imediatos.



| VARIAU. | CHAUE | ESTADO |
|---------|-------|--------|
| x1 | CH1 | ? |
| x2 | CH2 | 1 |
| x3 | CH3 | 1 |
| x4 | CH4 | 1 |
| x5 | CH5 | ? |
| x6 | CH10 | ? |
| x7 | CH20 | 1 |
| x8 | CH30 | ? |

CHVS.DECLARADAS : 2,3,4,20
 C. N-DECLARADAS : 1,5,10,30

Figura 3.2.(a): Rede exemplo.



NOMENCLATURA:

CH1/β - Chave 1 é declarada fechada
 CH1/1 - Chave 1 é declarada aberta

FIGURA 3.2. (b) : Árvore binária de decisões

No problema em questão, cada nó corresponde a um estado do vetor de decisões que, por sua vez, gera uma condição topológica-elétrica da rede. O nó raiz, nó-0, tem associado o vetor inicial de decisões, no qual só estão definidas as chaves declaradas previamente. Cada vez que vai sendo aprofundada a árvore uma nova chave é declarada. Isto significa que cada nova subárvore corresponde a um problema de reconfiguração menor (menor o número de chaves a declarar), até atingir uma folha onde todas as chaves estão declaradas. Na Figura 3.2.(b), o nó "3", por exemplo, tem declaradas seis chaves, uma a mais que o nó "1", portanto, daí para frente, deverá resolver um problema mais simples.

Na árvore construída cada ramo ("branch") corresponde à transição de dois estados de rede devido a uma determinada operação de chave.

Um nó da árvore corresponde a uma "solução", se todas as chaves do respectivo vetor de decisões foram declaradas. Qualquer nó da árvore que sendo solução associe um estado da rede obedecendo todas as restrições operativas impostas pelo problema corresponderá a uma "solução viável". Dentre todas as soluções viáveis será escolhida como melhor solução aquela que iluminar o maior número de zonas escuras com um mínimo de desbalanceamento de carga (menor índice de desvio-padrão).

Se no problema de restabelecimento de zonas escuras



existirem m chaves não-declaradas, então 2^m possíveis combinações de chaveamentos (soluções) deverão ser analisadas. A obtenção da melhor solução através de uma busca exaustiva, que percorra a árvore inteiramente, pode facilmente se tornar inviável computacionalmente.

3.4. ESTRATÉGIAS DE SOLUÇÃO

Como foi visto, o problema elétrico em questão, leva a uma análise combinatória de alternativas que pode ser explosiva.

A estratégia de solução tipo "força bruta", como "depth-first", "breadth-first", etc., [1,35], garante a obtenção de uma solução ótima mas é inaceitável sob o ponto de vista computacional para aplicações práticas do problema.

Uma melhoria em relação à "força bruta" consiste em usar técnicas de busca com estratégias de controle de expansão dos nós (métodos tais como "best-first" e "branch-and-bound" com funções de avaliação, emprego de critérios de poda, etc.) que permitem encontrar a solução ótima (se existir) com menos esforço computacional mas, ainda proibitivo em aplicações práticas.

Por outro lado, tem-se as estratégias fortemente

heurísticas (baseadas quase exclusivamente no conhecimento do problema e experiência de especialistas). Elas em geral, são rápidas permitindo encontrar logo uma solução, mas não garantem a obtenção da solução ótima. Incluem-se aqui as tentativas de representar o conhecimento através de regras de produção e utilizar mecanismos de inferência padronizados (por exemplo, PROLOG).

Neste tipo de abordagem, tem-se os trabalhos de CASTRO [2] e LIU-outros [4].

No primeiro, o problema de restabelecimento é enfrentado usando uma forte dose de heurística que permite realocar o máximo de zonas rapidamente, mas, sem garantir que a solução atingida seja ótima. A principal regra heurística usada é: "colocar a zona escura mais prioritária no alimentador menos carregado no momento". As simulações mostraram que esta regra leva a obtenção de soluções bastante razoáveis mas não necessariamente a solução ótima.

No segundo, o problema elétrico é resolvido usando um sistema especialista aplicando o procedimento que o operador experiente empregaria para resolver a situação. No primeiro passo tenta-se colocar um grupo de zonas escuras (macrozona-escura) em algum alimentador; se não tiver êxito, as zonas escuras são tomadas individualmente. Nos casos anteriores, se tiver mais de um alimentador alternativo, o

conflito é resolvido escolhendo o alimentador de menor carga. Se ainda não dar certo, é executado um remanejamento de carga nos alimentadores para facilitar a realocação. Isso significa inserir também uma forte dose de heurística. Neste caso a preocupação, novamente, é obter rapidamente uma solução do problema, sem importar se é ótima.

A estratégia de solução proposta neste trabalho está direcionada de forma a utilizar as melhores características de cada tipo de abordagem. O algoritmo proposto é construído sobre uma estrutura de busca exaustiva (podendo executá-la se não houver outro jeito), mas sem o propósito de realizá-la. Utiliza procedimentos de especialistas humanos na resolução do problema (através de regras) na busca de uma solução inicial que apresente valores razoáveis para a função objetivo. Considerando mecanismos tipo "backtracking" continua-se a busca de soluções viáveis (obedecem às restrições operacionais) e que sejam melhores que a anterior levando à solução ótima. Usam-se técnicas heurísticas de controle e de poda para evitar o crescimento desmedido do número de nós.

CAPÍTULO 4

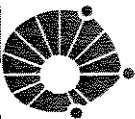
ALGORITMO BASEADO NA PROGRAMAÇÃO HEURÍSTICA E NA TEORIA DE DECISÕES PARA RECONFIGURAR REDES DE DISTRIBUIÇÃO

4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se o algoritmo para a reconfiguração de redes de distribuição primária proposto neste trabalho. Inicialmente são colocadas as estratégias globais que estabelecem como o algoritmo resolve o problema. Em seguida, descreve-se o algoritmo em termos dos seus detalhes específicos. Finalmente é desenvolvido um exemplo cujo objetivo é apresentar didaticamente a aplicação do algoritmo.

4.2. ESTRATÉGIA GERAL DE SOLUÇÃO

Como foi mostrado no Capítulo 3 o restabelecimento de energia, isolado um defeito permanente, consiste em determinar uma sequência de operações de chaves. Neste contexto a realocação das zonas escuras foi formulada como um problema de otimização combinatória.



O caráter combinatório do problema permite tanto o uso de ferramentas, quanto o desenvolvimento de estruturas e métodos no ambiente da Teoria de Decisões. Desta forma, todos os chaveamentos possíveis são colocados numa árvore onde cada nó representa o resultado de uma decisão de abrir ou fechar uma chave.

O problema da reconfiguração foi formulado utilizando uma árvore binária de decisões já que a natureza combinatória fica muito bem descrita desta forma e essa mesma estrutura é utilizada para implementar o método de resolução aqui proposto. Basicamente, o método combina estratégias de busca controlada, procedimentos heurísticos e regras que um especialista usaria para resolver o problema visando encontrar a melhor-solução sem percorrer toda a árvore de decisões (busca exaustiva). Esta estratégia geral foi inspirada pela referência [24].

A metodologia proposta para resolver o problema da reconfiguração consiste em decompor o problema em duas fases. A primeira fase, Fase 1, tem por objetivo obter o melhor estado final da rede iluminando o maior número de zonas escuras com o menor desbalanceamento possível. A segunda fase, Fase 2, consiste em obter a sequência de chaveamentos que permita avançar desde o estado inicial até o estado final garantindo a viabilidade de cada passo intermediário. Em outras palavras, a Fase 1 obtém qual a

melhor solução e a Fase 2 encarrega-se da implementação prática desta solução.

4.2.1. ESTRATÉGIA GERAL DA FASE 1

Consiste em ir tomando decisões sobre cada componente não-declarado do vetor de decisões a partir de uma condição inicial.

O melhor estado final da rede é obtido a partir do vetor de decisões desde que todos os seus componentes tenham sido declarados. O problema de otimização combinatória é abordado nesta fase e a estratégia de solução considera os aspectos que serão descritos a seguir:

i) Obter uma primeira solução-viável usando um procedimento baseado em regras que um especialista humano (por exemplo, operador do COD) usaria para tentar resolver o problema; esta solução será considerada como a primeira solução-candidata ("Incumbent") à melhor-solução.

ii) A partir desta solução-candidata procurar por outras soluções-viáveis, sendo que cada vez que for encontrada uma solução melhor que a solução-candidata do momento, aquela tornar-se-á a nova solução-candidata; como se decide que uma solução é melhor que outra será explicado mais adiante. Esgotado o espaço de busca a última solução-

candidata será considerada a melhor-solução.

iii) A geração das novas soluções-viáveis tem como regra básica afastar-se o mínimo possível da trajetória estabelecida na obtenção da primeira solução-viável (procedimento humano). A aplicação desta regra evita a expansão descontrolada da árvore e baseia-se na hipótese de que a melhor-solução não ficará muito longe da primeira solução candidata.

iv) Se esgotado o espaço de busca, o algoritmo não encontrar nenhuma solução viável o problema será considerado sem solução nas condições impostas.

4.2.2. ESTRATÉGIA GERAL DA FASE 2

Esta fase não envolve a resolução de um problema de otimização, por isso poder-se-ia chamar de fase de pós-otimização. O objetivo é elaborar uma sequência de chaveamentos que viabilize a implementação prática da melhor-solução.

Logo após determinado o vetor de decisões (x) são comparadas cada uma das chaves dos estados da rede correspondentes às condições inicial e final do restabelecimento. Apenas as chaves que mudaram de posição durante o processo de simulação são ordenadas numa sequência



de manobras cuja execução permite atingir o estado final da rede, garantindo que em cada passo sejam atendidas as restrições impostas pela operação do sistema.

4.3. ESTRATÉGIAS ESPECÍFICAS

A seguir serão descritos os procedimentos específicos que permitem detalhar e completar as estratégias gerais expostas anteriormente.

4.3.1. CONDIÇÕES DE CONTORNO DO VETOR DE DECISÕES

A primeira providência antes do disparo do processo de resolução é estabelecer claramente as condições de contorno a que deve se submeter o vetor de decisões. Em outras palavras, é necessário definir quais as chaves declaradas e não-declaradas no vetor de decisões inicial. Em princípio, todas as chaves existentes na rede são componentes do vetor x , mas algumas delas podem ser previamente declaradas e permanecer fixas durante a resolução do problema.

A condição de contorno mais usual é aquela na qual todas as chaves que isolam a zona defeituosa sejam previamente declaradas como abertas e, ao mesmo tempo, as



chaves que alimentam as demais zonas iluminadas (alimentadores sem defeito) sejam previamente declaradas como fechadas. Esta condição de contorno equivale ao seguinte problema: "iluminar da melhor maneira possível as zonas escuras sem mexer nos consumidores energizados". As demais chaves são consideradas não-declaradas e portanto variáveis.

Uma condição alternativa seria relaxar a declaração das chaves previamente fechadas, significando que no processo de reconfiguração "é possível transferir consumidores energizados de um alimentador para outro". Se todas as chaves são consideradas não-declaradas, então o problema equivale a um balanceamento geral da rede na ausência de defeito.

É importante ressaltar que qualquer que seja a condição de contorno inicial o algoritmo se aplica da mesma maneira, porém o espaço de busca é que será diferente.

4.3.2. OBTENÇÃO DA PRIMEIRA SOLUÇÃO VIÁVEL

O restabelecimento do serviço de energia é um problema que até agora tem sido resolvido razoavelmente através de procedimentos heurísticos que se supõe que um especialista humano usaria. Se este problema pretende-se que

seja resolvido automaticamente como uma função de controle em um COD automatizado é de se esperar que a solução obtida desta forma melhore aquela fornecida pelo especialista. Portanto, o algoritmo deve começar gerando uma solução do tipo que um operador experiente tentaria obter através de regras heurísticas ("human-like"), tornando-se esta na primeira solução viável e na primeira solução candidata à melhor-solução. Esta solução estabelece critérios mínimos que as soluções devem atender. A utilização de estratégias deste tipo tem-se mostrado adequada na solução de diferentes problemas, tais como, na detecção de erros grosseiros na estimação de estado em sistemas de energia elétrica [24] e na escala de manutenção de geradores [33].

a) Procedimento do Especialista Humano

A questão é como garantir que a primeira solução-viável represente uma solução razoável. Para isso, recorre-se ao procedimento que um especialista tentaria aplicar para resolver este problema.

A seguir apresenta-se um conjunto de regras que um operador aplica para tentar resolver os problemas combinados de realocação e de distribuição de carga nos alimentadores:

1. procura pelo alimentador menos carregado,
2. pega a zona escura mais prioritária para ser

iluminada, procurando a chave que consiga ligá-la no alimentador de menor carga,

3. se a topologia permite a ligação, o operador verifica se são atendidos os limites topológicos e elétricos; se positivo o operador executa a manobra de religamento,
4. se não encontrar a chave ou forem violadas as restrições operacionais, pega a zona escura que segue em prioridade, e assim por diante,
5. se resultar impossível colocar alguma zona escura no alimentador menos carregado, o operador continua o procedimento tomando o segundo alimentador de menor carga, e assim até esgotar todas as possibilidades.

Este procedimento leva a resultados bastante satisfatórios, como demonstram as simulações apresentadas nas referências [2] e [4].

b) Estratégia de Busca

Após ter simulado a ligação da primeira zona escura a manobra de chave utilizada na operação é fixada no vetor de decisões, sendo que daí para frente seu estado não poderá ser alterado. A escolha da chave e decisão da manobra na próxima simulação estão baseados na operação feita no



instante imediatamente anterior. Este critério corresponde à estratégia de busca-em-profundidade ("depth-first") [1].

A aplicação da estratégia de busca-em-profundidade a partir de um nó gerado após um chaveamento terminará quando todas as chaves do vetor de decisões estiverem declaradas. O aprofundamento da árvore também pode terminar quando seja atingido um solução viável parcial (ou seja, mesmo atendendo todas as restrições, nem todas as chaves estão declaradas), mas tendo realocadas todas as zonas escuras. Isto evita a geração desnecessária de nós sucessores atuando como um mecanismo de controle da expansão.

c) Viabilidade dos Sucessores

Devido à relação de descendência que existe entre os nós sucessor e antecessor, se um nó conduz a um estado de operação (podendo ser parcial) em que não são obedecidas as restrições, os sucessores gerados a partir dele herdarão as características do pai. Porém, no problema em questão existe a possibilidade que a inviabilidade de um nó seja compensada posteriormente pela declaração de uma outra chave.

Não obstante, em vez de realizar o teste de viabilidade atingida uma folha, este será feito toda vez que esteja-se gerando um nó-sucessor, evitando deste modo continuar a expansão quando um nó viola as restrições.

Existem duas razões que justificam o teste em cada nó:

1. **controle de afastamentos:** o número de afastamentos, como será explicado mais adiante, é referido à trajetória guiada pela heurística com as restrições relaxadas de maneira que o controle é feito tanto procurando a primeira solução viável como as novas alternativas. Por isso, embora podendo ser viáveis nem todos os nós fora da trajetória escolhida pelo procedimento humano serão simulados (estratégia geral);

2. **sequência viável:** qualquer trajetória que conduza a uma solução viável estará formada por operações que abrem e fecham chaves; olhando apenas para os fechamentos, se a cada vez que eles são simulados verificam-se as restrições então se garante que essa mesma ordem pode ser usada na Fase 2, quando irá ser construída a sequência ótima, porque nenhuma manobra de fechamento será inviável.

d) Controle da Otimalidade

Obtida a primeira solução candidata à melhor-solução verifica-se o número de zonas iluminadas e calcula-se o índice de desbalancamento (desvio-padrão). Estes valores caracterizam a solução candidata do momento e serão considerados como limitantes-inferiores ("lower-bounds") [1], permitindo decidir se uma solução é melhor que outra. Assim, serão desprezados posteriores soluções-viáveis que apresentem índices piores que estes.



4.3.3. ORDENAMENTO DAS CHAVES A DECLARAR

A estratégia de busca-em-profundidade para a expansão dos nós sucessores é combinada com uma estrutura dinâmica de ordenamento de chaves.

Cada novo estado viável parcial é gerado levando em conta as condições elétricas e topológicas do estado viável parcial que foi gerado no instante imediatamente anterior e levando em conta qual chave a ser declarada tem mais atrativos para ser escolhida. Este procedimento é aplicado para cada expansão.

A escolha da próxima chave candidata a ser declarada está baseada na heurística do especialista que foi apresentada, ou seja, será aquela que fechada permita colocar uma nova zona escura no alimentador menos carregado. A ordem dos chaveamentos é decidida baseada no fato que para iluminar uma zona escura é preciso tentar primeiro fechar uma chave. Daí que a árvore é aprofundada na direção de todas as possíveis manobras por fechamentos.

O uso da heurística do especialista humano na escolha da próxima chave permite ter um mecanismo de geração "mais inteligente" de modo que a procura fique menos exaustiva, diminuindo o espaço de busca. Isto conduz a que a

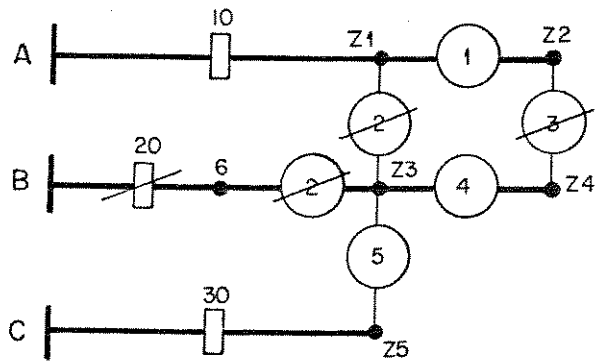


FIGURA 4.1 (a): Rede do exemplo

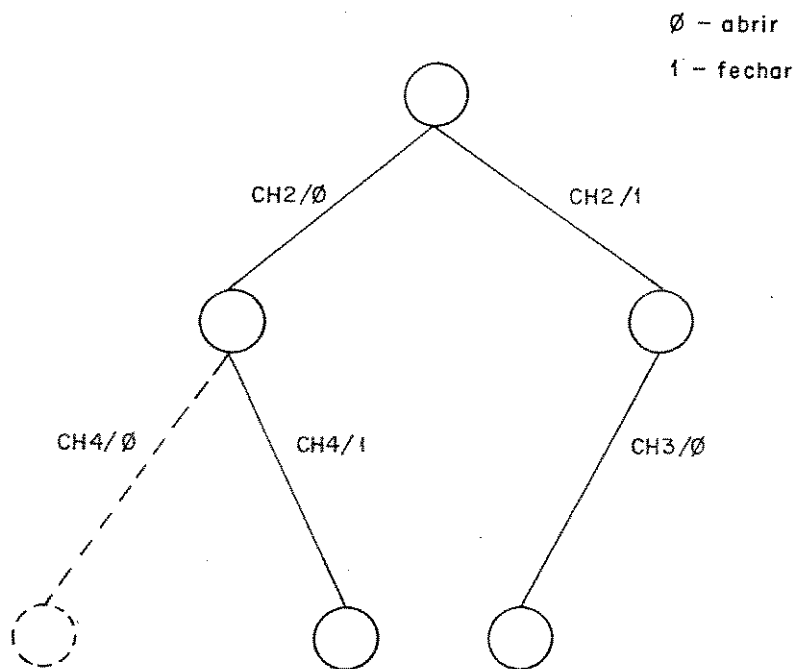


FIGURA 4.1 (b): Vista parcial da árvore de decisões

FIGURA 4.1 : Ordenamento dinâmico de chaves



ordem em que são gerados os sucessores não é fixa, mas sim que vai depender das condições do momento.

Como exemplo, considere-se a rede mostrada na Figura 4.1.(a). As zonas Z3 e Z4 devem ser iluminadas e dispõe-se de dois alimentadores ativos (A e C). Se o primeiro chaveamento declarado é fechar CH2 para realocar Z3, a segunda chave candidata a declarar, a partir das atuais condições, será CH4. Enquanto que, se o primeiro chaveamento a declarar é abrir CH2, a segunda chave candidata a declarar nestas condições será a chave CH3. A Figura 4.1.(b) mostra parte da árvore de decisões colocando em evidência a assimetria que resulta em usar este critério heurístico de seleção das chaves.

Um segundo mecanismo que atua sobre a geração dos chaveamentos é o controle dos afastamento. Escolhida a chave candidata a declarar é testado se os chaveamentos que a partir dele são criados geram trajetórias que se afastam mais do que o permitido.

De forma geral, resolver o problema da reconfiguração pode ser visto como apenas o problema de declarar, ordenadamente, um conjunto de chaves. No procedimento adotado neste trabalho, primeiro tenta-se declarar as chaves que se ligam às zonas escuras e finalmente as restantes chaves não-declaradas.

4.3.4. TESTES DE VIABILIDADE

As restrições que devem ser obedecidas em cada nó são verificados através de testes de viabilidade que se aplicam em cada expansão. As restrições operacionais podem ser de origem topológica ou elétrica.

Uma declaração de chave aberta ou fechada pode ter como consequência diferentes situações. Uma manobra de fechamento pode conduzir a:

- * ligar duas zonas escuras criando ou aumentando uma macrozona escura,

- * ligar duas zonas iluminadas formando um anel. As duas zonas podem pertencer ao mesmo alimentador ou a alimentadores diferentes,

- * ligar uma zona escura com uma iluminada. A zona escura pode ser uma zona isolada ou pertencer a uma macrozona escura. A carga da zona ou macrozona escura vai ser acrescentada àquela já existente no alimentador.

Uma manobra abrindo chave pode conduzir a:

- * separar duas zonas escuras, duas macrozonas escuras ou uma combinação das anteriores,

- * desligar uma zona iluminada, ou um grupo de

zonas iluminadas (apenas permitida operação radial),

* separar duas zonas iluminadas que pertencem cada uma a um alimentador diferente (operação em anel).

As restrições topológicas utilizadas neste trabalho são:

* Impedir a formação de estruturas em anel (permite-se apenas operação radial),

* Impedir a formação de circuito fechados contendo apenas zonas escuras (anéis entre zonas escuras).

Em relação as restrições elétricas deve-se respeitar os limites elétricos de operação, ou seja, manter as tensões dentro da faixa especificada e a corrente não ultrapassando limites máximos. A rigor, estes limites devem ser verificados resolvendo-se o circuito elétrico da rede, após rodar fluxos de carga ou métodos aproximados [19]. Neste trabalho, por simplicidade na programação, apenas estão sendo consideradas as sobrecargas nos alimentadores em termos da potência máxima que o cabo possa ser submetido. Desta forma o teste de limite elétrico somente consiste no cálculo da potência que o alimentador estaria fornecendo no instante correspondente ao teste comparada com o seu limite de capacidade térmica. As situações que devem ser consideradas são:

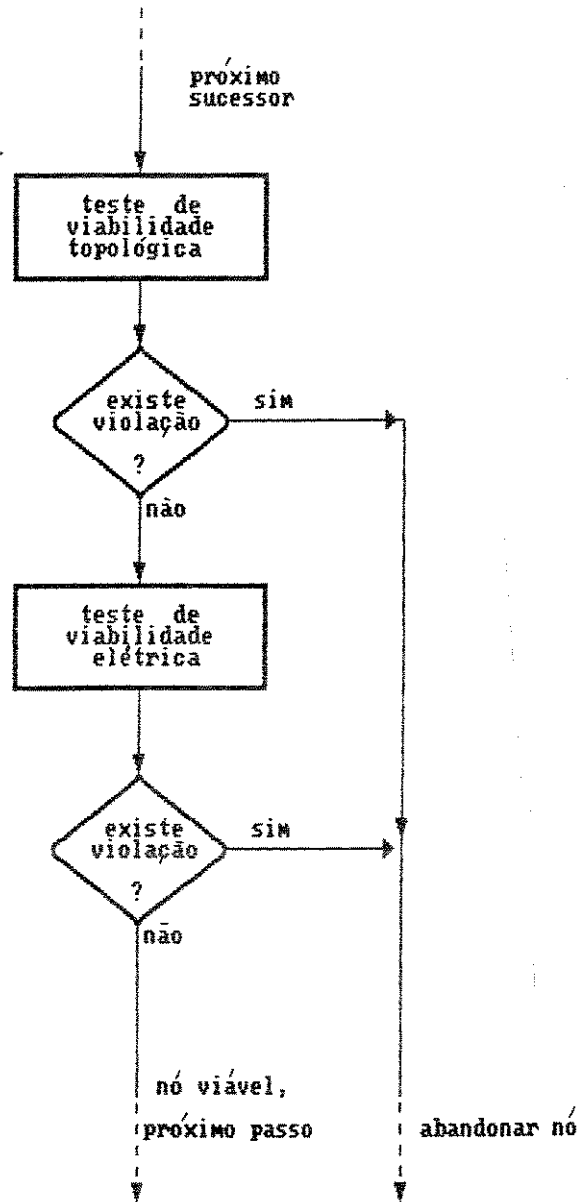


Figura 4.2.: Avaliação de um sucessor.



* que o alimentador possua uma folga de potência para aceitar uma zona escura individual,

* que o alimentador possua uma folga de potência para aceitar uma macrozona escura,

* que os alimentadores (se for possível uma operação em anel), possuam uma folga de potência para colocar uma zona (ou macrozona) escura,

* a abertura de um anel (se for admissível esta estrutura) diminui a capacidade de fornecimento de energia.

A Figura 4.2 mostra como os testes de viabilidade são aplicados na avaliação de um nó-sucessor.

4.3.5 NOVAS SOLUÇÕES VIÁVEIS

Após ter sido obtida a primeira solução candidata à melhor-solução o passo seguinte consiste em buscar outras soluções viáveis que se afastem o mínimo possível da trajetória escolhida pelo procedimento humano heurístico, utilizando um mecanismo de "backtracking" [22,28,30,32].

A procura é feita mediante um processo recursivo [26,28,29], (um problema mais simples é resolvido a cada vez) aplicando sobre cada nó os mesmos mecanismos de geração, estratégias de expansão, testes de viabilidade,

etc., usados na obtenção da primeira solução candidata.

A nova solução viável encontrada é submetida a um teste para decidir se será a nova candidata à melhor-solução. O teste considera dois índices:

* primeiro, o número de zonas iluminadas e,

* depois, o índice de desbalanceamento;

O primeiro índice atua como uma limitante inferior de modo que o teste não continua se a solução-viável apresenta um número menor de zonas iluminadas; isto coloca em evidência a estratégia utilizada para definir se uma solução viável é melhor que outra: "é melhor ter uma solução com mais zonas iluminadas do que uma solução com mais balanceamento". Em outras palavras, a função objetivo pode ser trocada conforme a situação.

O número de zonas iluminadas pela nova solução viável é comparado com o limitante definido pela candidata do momento; se for maior, a solução-viável torna-se imediatamente a nova solução candidata. Se o número for menor, a solução é ignorada. Se o número for igual então compara-se o índice de desbalanceamento. Se esse for menor a solução torna-se a nova solução-candidata, caso contrário ignora-se. A Figura 4.3 ilustra através de um diagrama de blocos o teste a que é submetido uma solução viável.

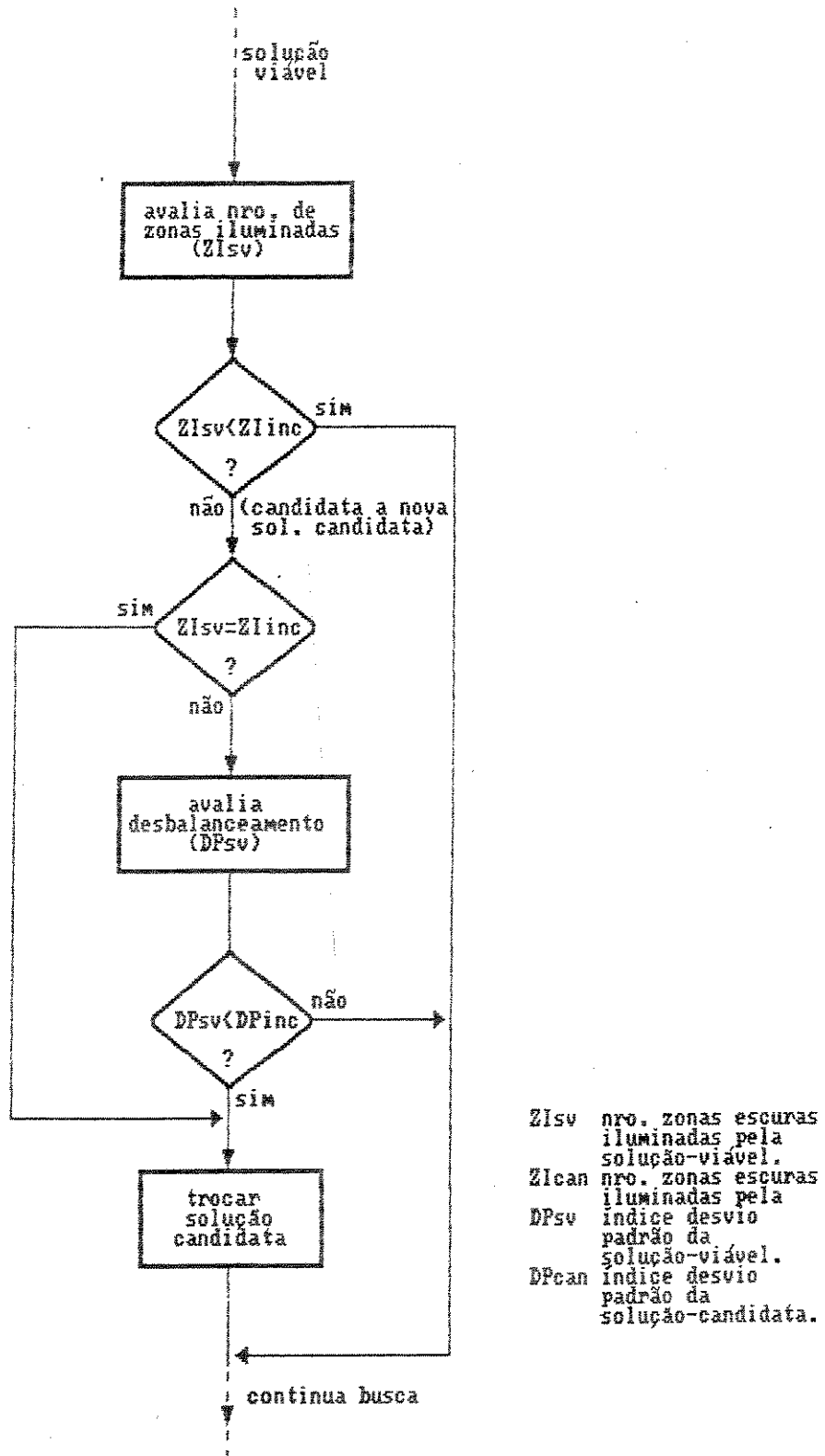


Figura 4.3.: Diagrama de Blocos ilustrando como se troca de solução-candidata.

O índice de desbalanceamento utilizado é aquele baseado no desvio-padrão, como definido no Capítulo 2:

$$DP = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{1}$$

onde,

x_i carga do alimentador i ,

\bar{x} valor médio das cargas dos alimentadores,

n número de alimentadores.

Obtida uma nova solução candidata à melhor-solução, verifica-se o número de zonas iluminadas e calcula-se o índice de desbalanceamento. Estes valores serão considerados como os novos limitantes inferiores. Esta mudança de função objetivo permite avançar na procura de soluções viáveis que melhorem a solução candidata do momento.

O procedimento geral de procura de novas soluções viáveis continua até que se esgotem os nós do espaço de busca e então a última solução-candidata será considerada a melhor-solução. A Figura 4.4 dá uma visão geral da busca de novas soluções candidatas à melhor-solução.

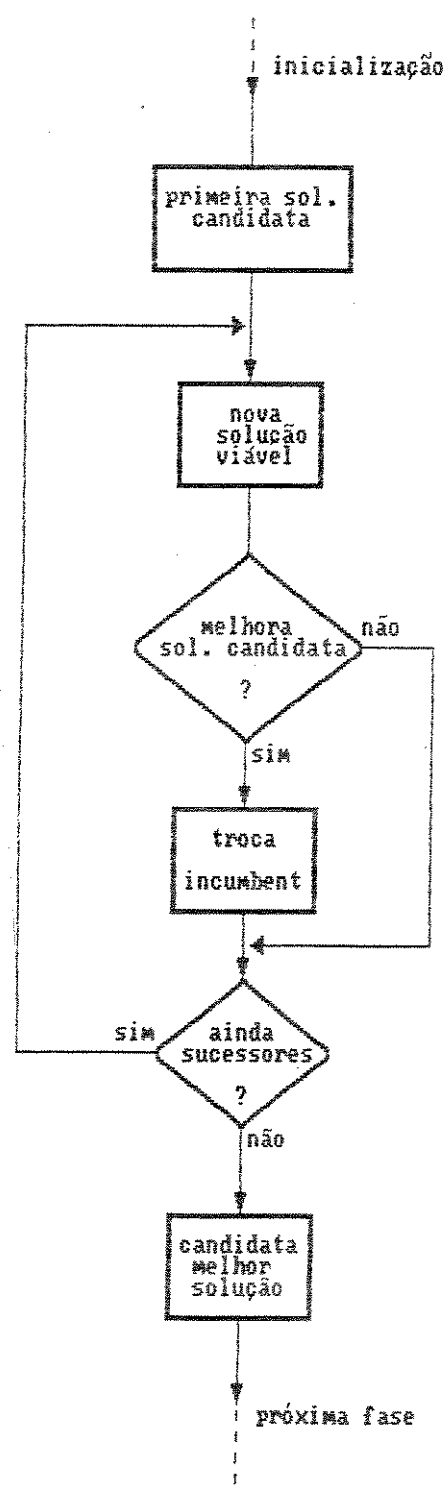


Figura 4.4.: Diagrama de Blocos ilustrando a busca de novas soluções viáveis.

4.3.6. CONTROLE DE AFASTAMENTOS

O mecanismo de "backtracking" utilizado na procura de novas soluções viáveis, onde possa estar contida a melhor-solução, é aplicado a partir da trajetória que gerou a primeira solução candidata, afastando-se dela progressivamente. Porém, a busca não é feita sobre a árvore toda mas fica restrita a uma região controlada próxima à primeira solução candidata, considerando que as decisões baseadas no conhecimento de um especialista leva a uma boa inicialização. Em outras palavras, afastar-se da primeira trajetória significa ir desconfiando das decisões do especialista.

O controle de afastamentos inserido no algoritmo atua como um mecanismo heurístico que evita a geração desnecessária de chaveamentos e a expansão exagerada da árvore.

Baseado no procedimento humano o fechamento de uma chave apresenta boa chance de cumprir com o objetivo proposto de ligar uma zona escura. Isto é levado em conta associando ao chaveamento um índice de valor nulo (0), enquanto que a operação de abrir é "castigada" associando-lhe o valor unitário (1). Como ilustra a Figura 4.5.(a), a manobra da esquerda (fechar) leva um índice "0" e a operação da direita (abrir), o índice "1".

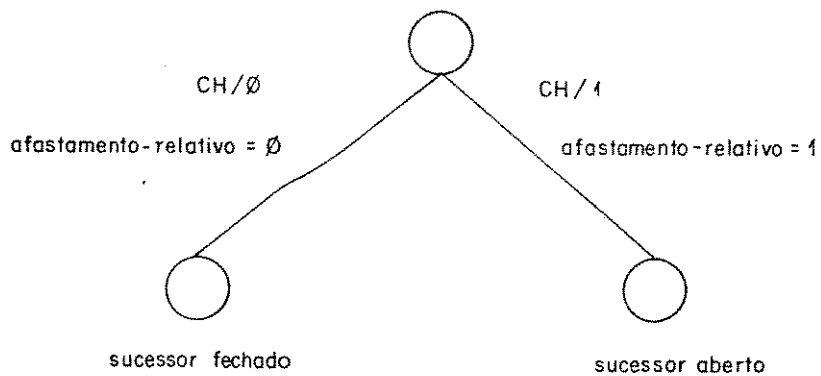


FIGURA 4.5. (a) : Índices associados à simulação de manobras.

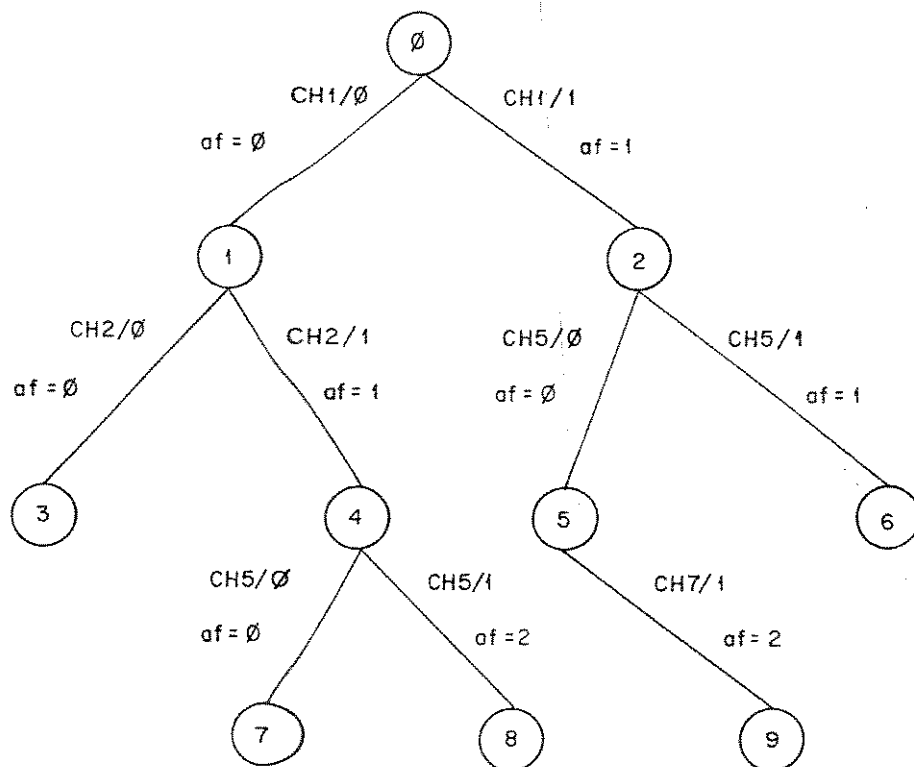


FIGURA 4.5.(b) : Cálculo dos afastamentos.

As duas medidas são avaliadas tomando como referência global a trajetória definida pela solução que seria gerada usando o critério humano com todas as restrições relaxadas. O afastamento do nó "n", $af(n)$ é medido considerando a manobra simulada ("afastamento-local") na chave CH e o afastamento do nó-pai ("afastamento-pai"):

$$af(n) = \text{afastamento-pai}(p) + \text{afastamento-local}(CH)$$

onde,

n nó em questão,
p nó pai,
CH chave manobrada.

A Figura 4.5.(b), ilustra como é avaliado o índice de afastamento $af(n)$ a partir da árvore parcial usada como exemplo. A trajetória formada pelos nós 0,1,3, não sendo necessariamente uma trajetória viável, fixa a referência global. O nó $n = 3$ foi gerado fechando a chave "CH2", portanto o índice relativo da manobra simulada é "0"; como a referência do nó-pai é "0", porque foi criado numa trajetória que respeita o critério do especialista, o seu correspondente afastamento é $af(3) = 0 + 0 = 0$. No caso do nó $n = 9$, a operação da chave é ponderada com "1" (foi castigada) e como a referência do nó-pai (nó 5) é "1" - porque mesmo sendo gerado usando a heurística algum dos seus ancestrais desobedeceu a heurística - o seu afastamento é

$af(9) = 1 + 1 = 2.$

O teste a que são submetidos os chaveamentos, após escolhida uma chave candidata a declarar, consiste em comprovar se qualquer uma das novas manobras conduz a trajetórias que se afastem da heurística mais do que permitido. O número máximo de afastamento precisa ser calibrado segundo as características da rede; o valor é previamente fornecido pelo usuário.

4.3.7. PROCEDIMENTOS DA FASE 2

Quando esgotado o espaço de busca de novas soluções viáveis a solução candidata torna-se a melhor-solução. Na fase seguinte, Fase 2, elabora-se a sequência viável de chaveamentos que permita a implementação prática da melhor-solução.

Os critérios gerais são:

I) se a solução candidata corresponde a uma solução parcial, deverá ser completado o vetor de decisões, declarando-se abertas todas as chaves não-declaradas.

II) construir a sequência-ótima de chaveamentos, considerando:

* comparar o estado inicial das chaves com o

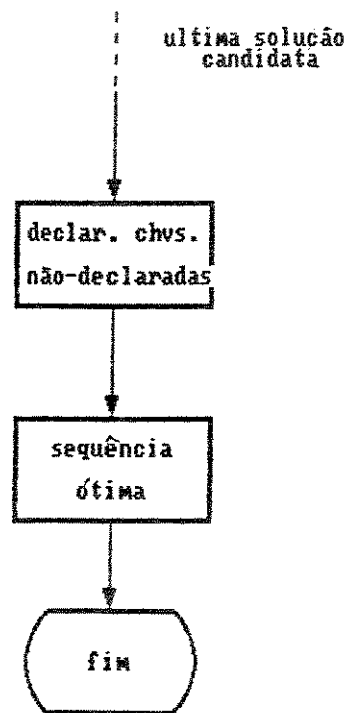


Figura 4.6.: Sequência ótima.

estado final indicado pelo vetor de decisões,

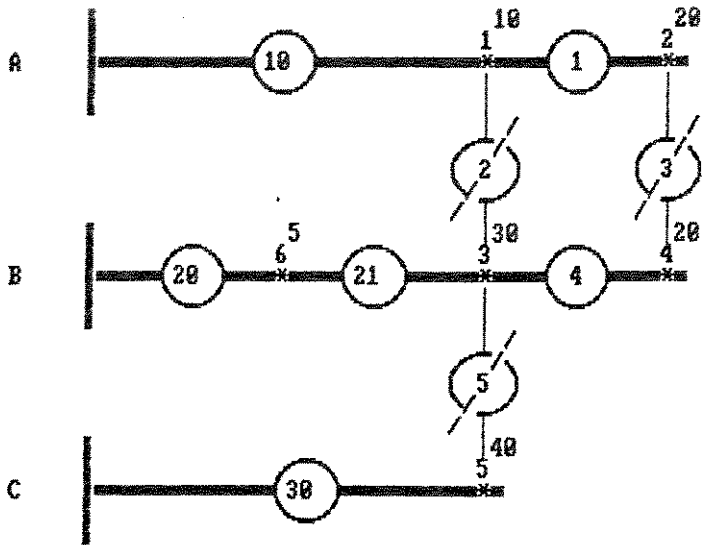
- * pegar as chaves que mudaram de posição formando um grupo com aquelas que abrem e outro com aquelas que fecham,
- * a ordem das chaves que fecham será aquela fornecida pela solução-candidata,
- * formar uma lista com as chaves que abrem na cabeça e as que fecham na cauda; esta lista corresponde à sequência ótima.

Na Figura 4.6 ilustra-se globalmente a construção da sequência-ótima.

4.4. SIMULAÇÃO DIDÁTICA

Para uma melhor compreensão do algoritmo proposto neste trabalho será simulada a reconfiguração de uma rede de pequena dimensão, mas tendo a capacidade didática de ilustrar a aplicação de todas as estratégias que sustentam o algoritmo.

Na rede do exemplo apresentada na Figura 4.7. é simulado um defeito na zona Z6. Como resultado do isolamento da zona defeituosa ficam escuras as zonas Z3 e Z4. O problema a resolver será tentar realocar as zonas escuras não-iluminadas.



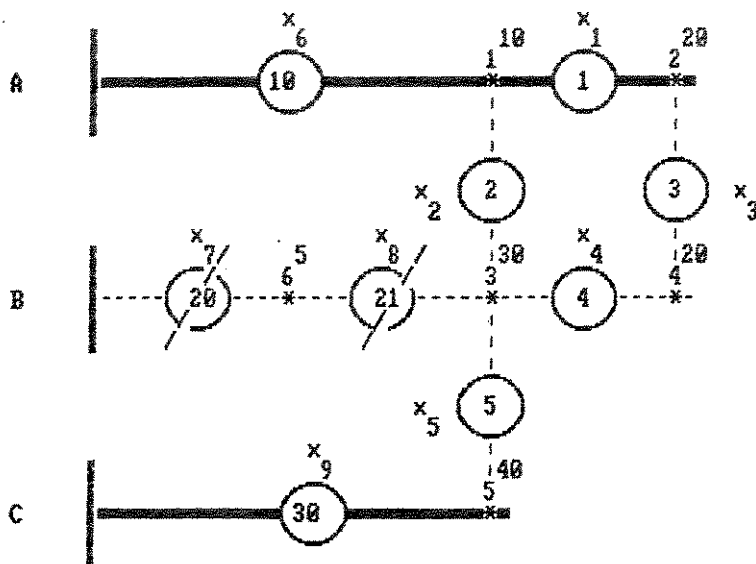
Comentários:

- * zona de carga
- 40
- 5
- * zona 25, carga 40 p.u.
- 1 chave 1 fechada (CH1/0)
- 5 chave 5 aberta (CH5/1)

Figura 4.7.: Rede do exemplo. Condição de pré-falta.

TABELA 4.1

| Alimentador | Carga (p.u.) | Zonas Iluminadas | Capacidade Máxima do Alimentador |
|-------------|--------------|------------------|----------------------------------|
| A | 30 | 1 - 2 | 70 p.u. |
| B | 55 | 3-4-6 | 70 p.u. |
| C | 40 | 5 | 70 p.u. |



$$X_{\theta} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, 1, 1, x_9)$$

Figura 4.8.: Condição isolamento do defeito na Z6.
(nó-0, Figura 4.9.).

TABELA 4.2

| Alimentador | Carga (p.u.) | Zonas Iluminadas | Capacidade Máxima do Alimentador |
|-------------|--------------|------------------|----------------------------------|
| A | 30 | 1 - 2 | 70 p.u. |
| B | 00 | - | 70 p.u. |
| C | 40 | 5 | 70 p.u. |

COMENTÁRIOS: Os nós que aparecem com triângulo correspondem a estações "paradas" por atingir os limites de potência. É permitido até três distorções de harmonicas (<3%) e a numeração das nos corresponde à ordem em que foram gerados.

CH2/B — Chave 1 e seccionador fechados
 CH3/I — Chave 3 e seccionador aberto

MONOCAPITULA

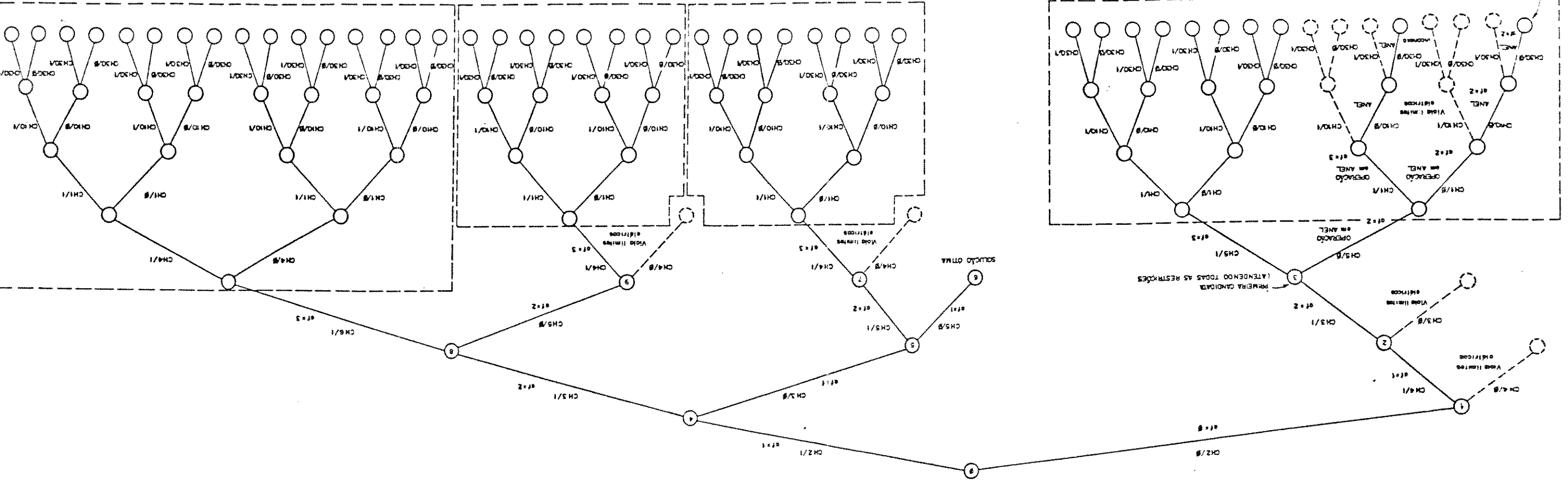


FIGURA 4.9: Alvo de desenvolvimento no exemplo



A condição de pré-falta está descrita na Tabela 4.1. Nestas condições, o estado das chaves é:

* chaves abertas : CH2-CH3-CH5,

* chaves fechadas: CH1-CH4-CH10-CH20-CH21-CH30.

As condições imediatamente depois de isolado o defeito estão descritas na Figura 4.8. e na Tabela 4.2; note-se que somente os alimentadores A e C serão considerados alimentadores ativos.

O desenvolvimento do processo de busca da melhor-solução gera a árvore mostrada na Figura 4.9. Para efeito de uma ilustração mais completa, nesta figura serão também mostradas algumas subárvores que mesmo não sendo criadas pelo algoritmo permitem esclarecer o funcionamento dos mecanismos de controle da expansão.

Da aplicação das estratégias globais e específicas, tem-se:

a) Condição de Contorno.

A primeira etapa do processo de busca, consiste em definir o vetor de decisões. Apenas as chaves que isolam o defeito vão ser declaradas a priori, de modo que:

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_9)$$

onde,

| | | | | |
|-------|---|----------|---|--------------------|
| x_1 | = | CH1 | } | não-declaradas |
| x_2 | = | CH2 | | |
| x_3 | = | CH3 | | |
| x_4 | = | CH4 | | |
| x_5 | = | CH5 | | |
| x_6 | = | CH10 | } | declaradas abertas |
| x_7 | = | CH30 | | |
| x_8 | = | CH20 = 1 | | |
| x_9 | = | CH21 = 1 | } | |

Portanto, o vetor de decisões inicial será:

$$x = (x_0, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9).$$

b) Número de Afastamentos.

Será permitido se afastar dois passos (à direita) da trajetória definida pela heurística usada na obtenção da primeira solução viável com as restrições relaxadas.

c) Expansão.

A escolha da chave candidata a declarar é baseada nas cargas dos alimentadores ativos (heurística), considerando como zona escura prioritária aquela de maior carga.

A primeira chave candidata a declarar será CH2

porque permite ligar a zona escura de maior carga (Z3) no alimentador mais leve (A). O seguinte passo será definir a viabilidade do chaveamento preferencial. O fechamento de GH2 não leva à violação de restrições:

* topologicamente, não forma anel nem circuitos inconexos de zonas escuras,

* eletricamente, não sobrecarrega ao alimentador A (60 p.u. < 70 p.u.).

Portanto, a chave GH2 é declarada fechada, ou seja,

$$x = (x_1, 0, x_3, x_4, x_5, x_6, 1, 1, x_9).$$

O controle de afastamentos associa "0" para o chaveamento preferencial e "1" para seu complemento, ou seja,

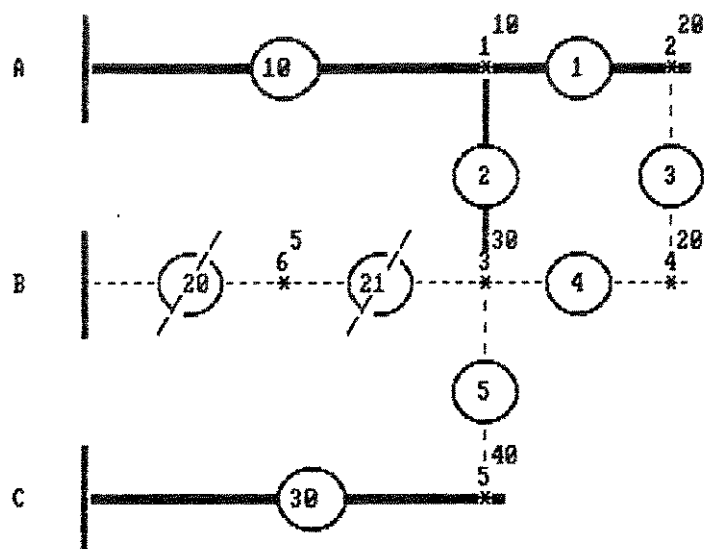
* fechar : $af(2) = 0,$

* abrir : $af(2) = 1.$

b) Procura da Primeira Solução Viável Candidata à Melhor Solução.

O novo estado parcial da rede está representado na Figura 4.10. e na Tabela 4.3..

Considerando a estratégia de busca-em-profundidade, a nova expansão é gerada a partir do estado da rede da



$$X_1 = (x_1, 0, x_3, x_4, x_5, x_6, 1, 1, x_9)$$

Figura 4.10.: Estado parcial da rede após fechada a chave CH2. (nó-1, Figura 4.9.).

TABELA 4.3

| Alimentador | Carga (p.u.) | Zonas Iluminadas | Capacidade Máxima do Alimentador |
|-------------|--------------|------------------|----------------------------------|
| A | 60 | 1-2-3 | 70 p.u. |
| B | 00 | - | 70 p.u. |
| C | 40 | 5 | 70 p.u. |



Figura 4.10. e Tabela 4.3., que corresponde ao nó-1 na Figura 4.9.. Nestas condições, a tentativa será colocar a Z4 (a zona prioritária do momento) no alimentador C. Como não existe chave que permita a ligação direta, a próxima chave candidata a declarar é CH4 (uma possibilidade) que coloca Z4 no segundo alimentador de menor carga (A).

O teste de viabilidade aplicado no chaveamento preferencial impede de fechar CH4 porque mesmo não violando as restrições topológicas sobrecarrega o alimentador C. Como o chaveamento complementar atende às restrições, a chave CH4 é declarada aberta, então:

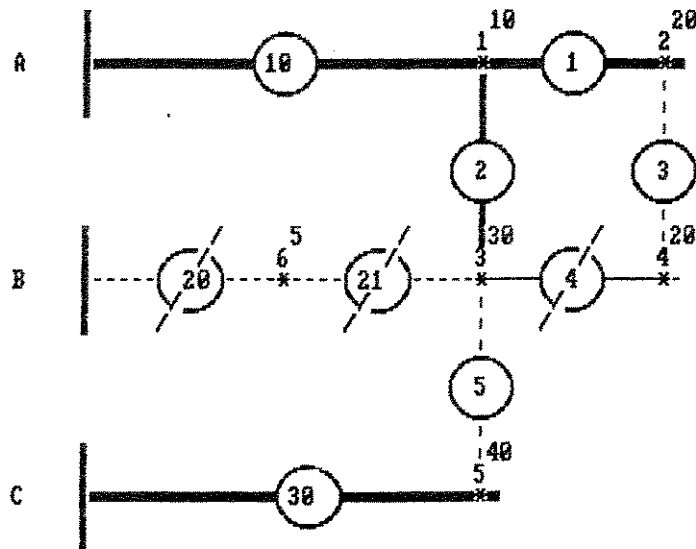
$$x = (x_2, 0, x_1, 1, x_3, x_5, 1, 1, x_6, x_9).$$

O controle de afastamentos pondera com "1" a manobra anterior, de modo que,

$$* \text{ abrir : } af(4) = 1.$$

O novo estado parcial da rede está representado na Figura 4.11. e na Tabela 4.4..

Aprofundando a busca deve-se escolher a próxima chave candidata a declarar a partir do nó-2, Figura 4.9., cujo estado parcial da rede está descrito na Figura 4.11. e na Tabela 4.4.. Como ainda a zona escura prioritária continua sendo Z4, o algoritmo considera novamente esta zona como candidata a ser conectada no alimentador menos,



$$X_2 = (x_1, 0, x_3, 1, x_5, x_6, 1, 1, x_9)$$

Figura 4.11.: Estado parcial da rede após aberta a chave CH4.
(nó-2, Figura 4.9.).

TABELA 4.4

| Alimentador | Carga (p.u.) | Zonas Iluminadas | Capacidade Máxima do Alimentador |
|-------------|--------------|------------------|----------------------------------|
| A | 60 | 1-2-3 | 70 p.u. |
| B | 00 | - | 70 p.u. |
| C | 40 | 5 | 70 p.u. |

carregado (C) e após, como esta tentativa falha, no próximo menos carregado (alimentador A). Porém, o fechamento da chave CH3 viola os limites elétricos. Como o chaveamento complementar atende às restrições, a chave CH3 é declarada aberta, portanto,

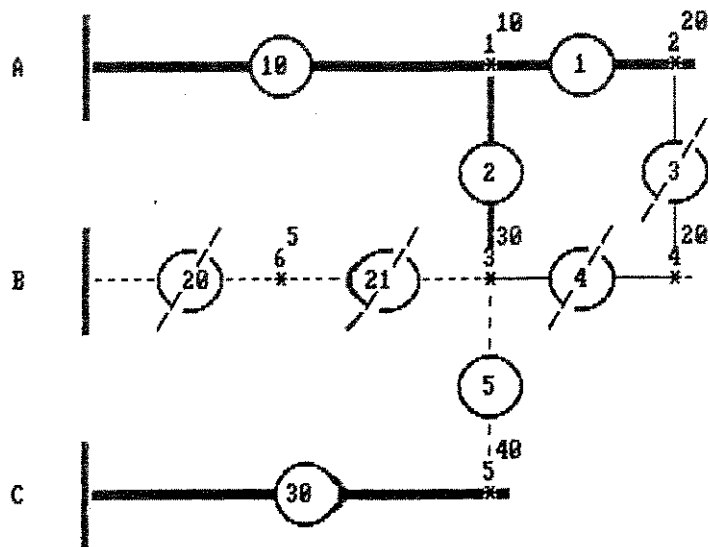
$$x = (x_3, 0, 1, 1, x_5, x_6, 1, 1, x_9).$$

O controle de afastamentos pondera com "1" esta manobra: como o nó-pai (nó-2) está um passo afastado da heurística preferencial, então:

$$\begin{aligned} * \text{ponderação-manobra}(3) &= 1, \\ * \text{afastamento-pai}(2) &= 1, \\ * \text{afastamento}(3) &= 1 + 1 = 2. \end{aligned}$$

O novo estado parcial da rede está representado na Figura 4.12. e na Tabela 4.5.. A partir da estratégia de aprofundamento da árvore e das condições atuais da rede, a próxima chave candidata a declarar é CH5, considerando que todas as chaves que se ligam à zona ainda escura Z4 já foram declaradas. Mas o fechamento de CH5 viola as restrições topológicas (forma anel), portanto a eventual geração do nó é abandonada. Além disso, o número de afastamentos da heurística preferencial é maior que o máximo permitido, desde que a manobra é ponderada como "1" e o afastamento do nó-pai é "2". Deste modo, o nó é abandonado.

Nestas condições, atinge-se um nó-terminal sendo



$$X_3 = (x_1, 0, 1, 1, x_5, x_6, 1, 1, x_9)$$

Figura 4.12.: Estado parcial da rede após aberta a chave CH3. (nó-3, Figura 4.9.).

TABELA 4.5

| Alimentador | Carga (p.u.) | Zonas Iluminadas | Capacidade Máxima do Alimentador |
|-------------|--------------|------------------|----------------------------------|
| A | 60 | 1-2-3 | 70 p.u. |
| B | 00 | - | 70 p.u. |
| C | 40 | 5 | 70 p.u. |

gerada uma solução viável parcial (nem todas as chaves foram declaradas), tornando-se a primeira solução candidata a melhor-solução. Esta solução tem associado como limitantes,

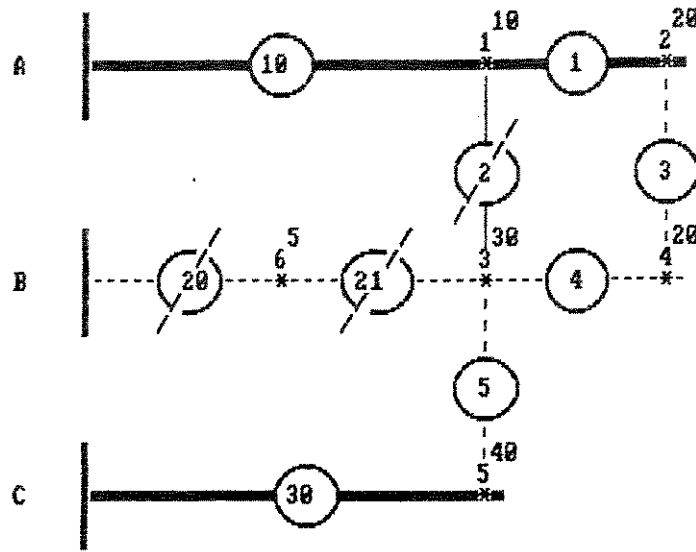
- * número de zonas escuras iluminadas = 1,
- (* carga atendida = 100 p.u. em 125 p.u. possíveis)
- * índice-desbalanceamento (desvio-padrão) = 24.9.

d) Procura de Novas Soluções-Viáveis.

A busca de novas soluções-viáveis começa a partir da primeira solução-viável realizando um procedimento "backtracking" até a primeira forquilha onde seja possível tomar uma decisão alternativa. Deste modo o nó-4 é gerado, desde que abrir a chave CH2 nem viola as restrições nem ultrapassa o número de afastamentos permitido.

A partir do estado parcial da rede mostrado na Figura 4.13 e na Tabela 4.6. são gerados os chaveamento CH3/0 e posteriormente CH5/0. A chave CH3 é escolhida desde que não é possível colocar no alimentador menos carregado (A) a zona mais prioritária continuando pela zona que segue em prioridade (Z4), neste caso o afastamento-local é $af(3) = 0$, já que obedece ao procedimento do especialista. O chaveamento CH5/0 gera o estado parcial da rede da Figura 4.14. e da Tabela 4.7.. Os respectivos vetores de decisão são:

$$x_4 = (x_1, 1, x_3, x_4, x_5, x_6, 1, 1, x_9)$$

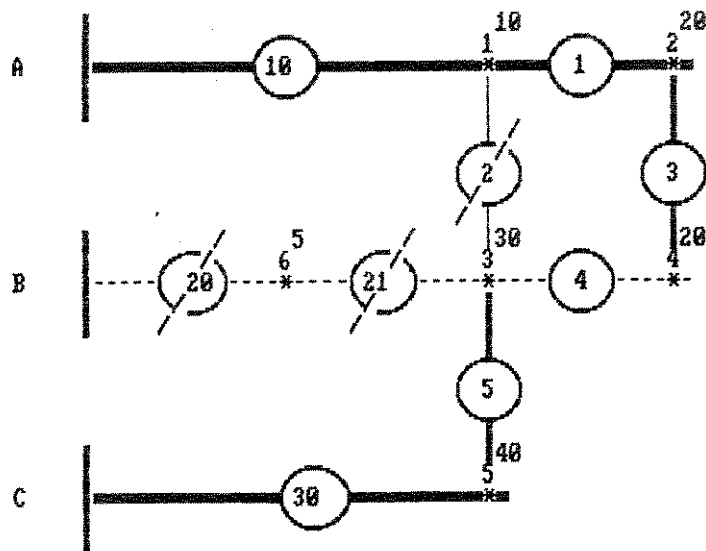


$$X_4 = (x_1, 1, x_3, x_4, x_5, x_6, 1, 1, x_9)$$

Figura 4.13.: Estado parcial da rede após aberta a chave CH2.
(nó-4, Figura 4.9.).

TABELA 4.6

| Alimentador | Carga (p.u.) | Zonas Iluminadas | Capacidade Máxima do Alimentador |
|-------------|--------------|------------------|----------------------------------|
| A | 30 | 1-2 | 70 p.u. |
| B | 00 | - | 70 p.u. |
| C | 40 | 5 | 70 p.u. |



$$X_6 = (x_1, 1, 0, x_4, 0, x_6, 1, 1, x_9)$$

Figura 4.14.: Estado parcial da rede após fechadas chaves CH3 e CH5. (nó-6, Fig. 4.9.).

TABELA 4.7

| Alimentador | Carga (p.u.) | Zonas Iluminadas | Capacidade Máxima do Alimentador |
|-------------|--------------|------------------|----------------------------------|
| A | 50 | 1-2-4 | 70 p.u. |
| B | 00 | - | 70 p.u. |
| C | 70 | 3-5 | 70 p.u. |

$$x_5 = (x_1, 1, 0, x_4, x_5, x_6, 1, 1, x_9).$$

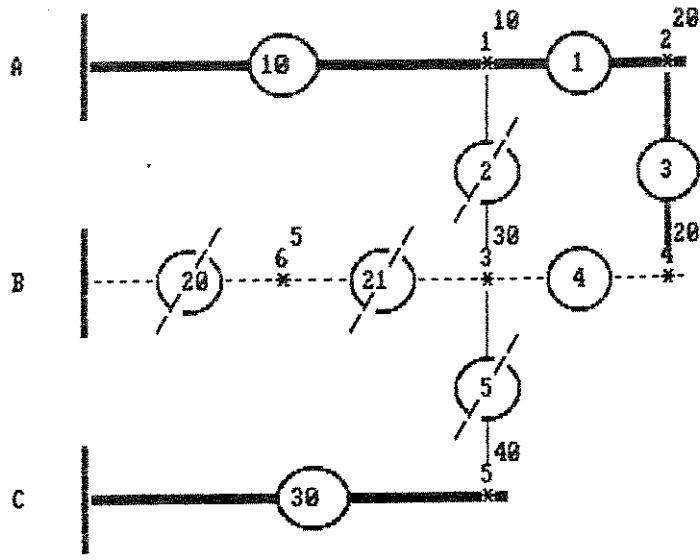
$$x_6 = (x_1, 1, 0, x_4, 0, x_6, 1, 1, x_9).$$

A declaração das chaves CH2, CH3, CH5 permite iluminar todas as zonas escuras, de modo que o estado obtido é considerado uma solução-viável parcial. Como esta solução supera o número de zonas escuras iluminadas pela atual solução-candidata ("incumbent"), torna-se a nova solução candidata à melhor-solução. Os novos valores para os limitantes são:

- * número de zonas escuras iluminadas = 2,
- (* carga atendida = 120 p.u. em 125 p.u. possíveis)
- * índice-desbalanceamento = 29.4.

O próximo estado a ser gerado é o nó-7 após abrir a chave CH5. A partir dele os sucessores são podados pois a chave seguinte (CH4) nem pode ser declarada fechada porque viola os limites elétricos, nem aberta porque se afasta mais do que é permitido. Portanto o nó-7 gera uma solução-viável parcial. Esta solução não melhora a solução candidata atual pois o número de zonas escuras iluminadas é menor. Este estado é representado na Figura 4.15. e na Tabela 4.8..

O nó-8 é gerado declarando-se aberta a chave CH3 que corresponde a um estado parcial viável. O correspondente estado da rede é mostrado na Figura 4.16. e na Tabela 4.9.. A partir deste estado é escolhida chave CH5 já que fechada

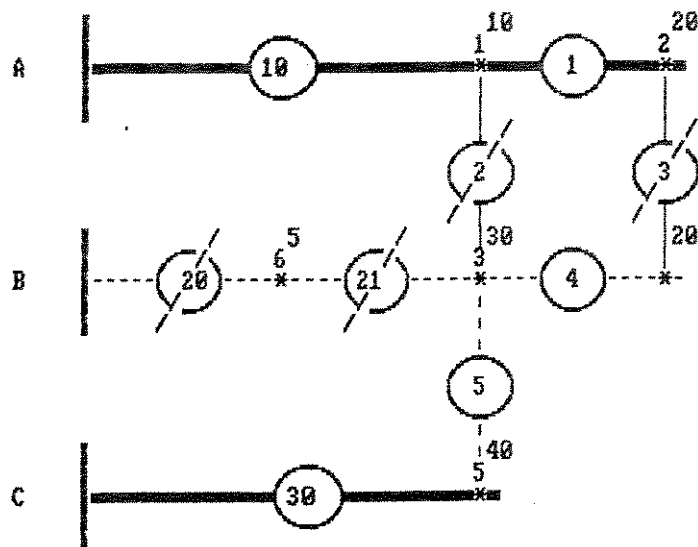


$$X_7 = (x_1, 1, 0, x_4, 1, x_6, 1, 1, x_9)$$

Figura 4.15.: Estado parcial da rede após abrir CH5. (nó-7, Figura. 4.9.).

TABELA 4.8

| Alimentador | Carga (p.u.) | Zonas Iluminadas | Capacidade Máxima do Alimentador |
|-------------|--------------|------------------|----------------------------------|
| A | 50 | 1-2-4 | 70 p.u. |
| B | 00 | - | 70 p.u. |
| C | 40 | 5 | 70 p.u. |



$$x_8 = (x_1, 1, 1, x_4, x_5, x_6, 1, 1, x_9)$$

Figura 4.16.: Estado parcial da rede após abrir a chave CH3.
(nó-8, Figura 4.9.).

TABELA 4.9

| Alimentador | Carga (p.u.) | Zonas Iluminadas | Capacidade Máxima do Alimentador |
|-------------|--------------|------------------|----------------------------------|
| A | 30 | 1-2 | 70 p.u. |
| B | 00 | - | 70 p.u. |
| C | 40 | 5 | 70 p.u. |

coloca a zona escura prioritária (Z3) no segundo alimentador de menor carga. Desde que o chaveamento atende as restrições, a chave CH5 é declarada fechada, assinalando um afastamento de valor 2. O seu chaveamento complementar (abrir CH5) é podado porque segue uma trajetória que se afasta muito da heurística. A Figura 4.17. mostra o estado parcial da rede.

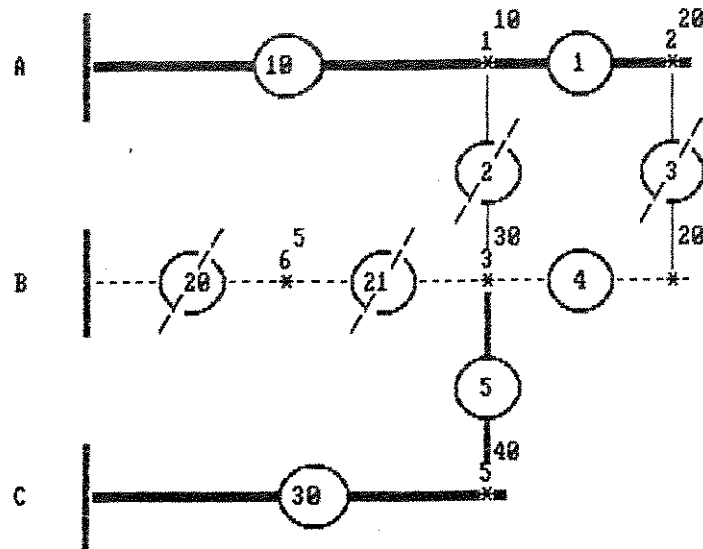
A partir do nó-9, na Figura 4.9., a chave escolhida como chave candidata a declarar é CH4, mas fechada coloca Z4 sobrecarregando o alimentador C. A abertura gera uma trajetória que se afasta demasiado da heurística. E assim, o nó-9 corresponde também a uma solução-viável parcial, mas não melhora a solução-candidata atual.

Como foram esgotados os sucessores a busca de novas soluções termina ficando como melhor-solução a melhor solução-candidata.

g) Sequência ótima. (Fase 2)

Como a melhor-solução corresponde a um estado da rede parcial a primeira etapa na construção da sequência-ótima consiste em declarar as chaves ainda não-declaradas. O vetor de decisões fornecido pela melhor-solução é:

$$x_{\text{melhor}} = x_B = (x_1, 1, 0, x_4, 0, x_6, 1, 1, x_9).$$



$$X_9 = (x_1, 1, 1, x_4, 0, x_6, 1, 1, x_9)$$

Figura 4.17.: Estado parcial da rede após fechar a chave CH5. (nó-9, Figura 4.9.).

TABELA 4.10.

| Alimentador | Carga (p.u.) | Zonas Iluminadas | Capacidade Máxima do Alimentador |
|-------------|--------------|------------------|----------------------------------|
| A | 30 | 1-2 | 70 p.u. |
| B | 00 | - | 70 p.u. |
| C | 70 | 3-5 | 70 p.u. |



Para esta finalidade a estratégia utilizada pelo algoritmo é,

* declarar abertas as chaves associadas com as zonas escuras,

$$x_4 = CH4 = 1$$

* para o resto, manter o estado da condição de pré-falta,

$$\begin{aligned} x_1 &= CH1 = 0 \\ x_6 &= CH10 = 0 \\ x_9 &= CH30 = 0. \end{aligned}$$

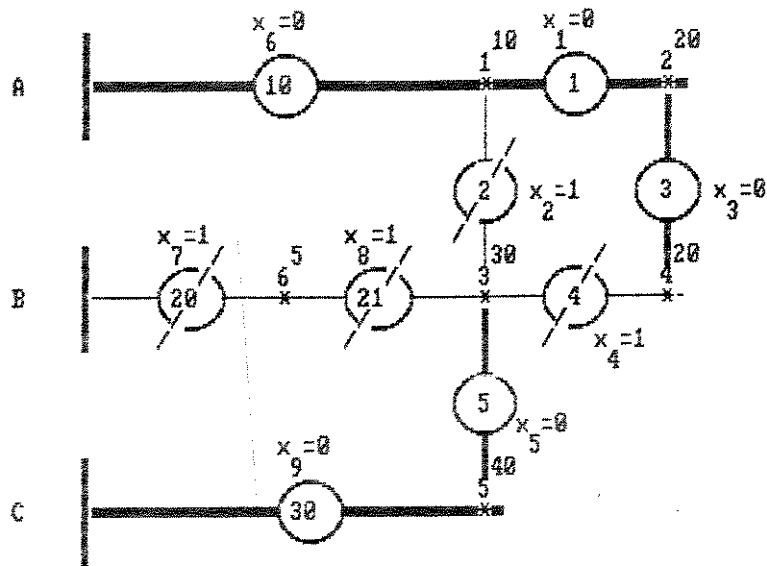
Deste modo, o vetor de decisões que maximiza o atendimento da carga escura e minimiza o desbalanceamento será:

$$x_{\text{melhor}} = x_B = (0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0).$$

A rede correspondente é mostrada na Figura 4.18.

A melhor-solução forneceu para as chaves que fecham a ordem CH3-CH5.

A sequência de chaveamentos é construída como uma lista, colocando na cabeça as manobras de abertura e logo em seguida as manobras de fechamento, indicadas pela melhor-solução, ou seja:



$$X_{\text{melhor}} = (0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0)$$

Figura 4.18.: Melhor estado final.



* abrir a chave CH4

* fechar, na ordem, CH3 e CH5.

CAPÍTULO 5

IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA

5.1. INTRODUÇÃO

Na primeira parte deste capítulo é descrito o programa onde foi implementado o algoritmo da reconfiguração explicando como os passos são interpretados no ambiente que foi desenvolvido. Nesta parte também é apresentado um sistema muito simples que permite diagnosticar, determinísticamente, o defeito. Na segunda parte se fornecem os resultados dos testes do algoritmo sobre uma rede de tamanho maior.

5.2. IMPLEMENTAÇÃO

A apresentação do algoritmo será desenvolvida em duas fases. Na primeira será dedicada à linguagem utilizada no programa e a segunda à estrutura do mesmo.



5.2.1. A LINGUAGEM

O método proposto neste trabalho foi implementado em um programa computacional escrito em PROLOG que será chamado de "Sistema Reconfigurador". O programa foi construído representando o conhecimento do sistema relativo ao problema na forma de regras de produção [25,28,36]. O Sistema Reconfigurador está composto por cerca de 90 regras.

Usou-se a versão 3.2 do Arity-PROLOG interpretado utilizando um microcomputador da família PC-XT.

Como o método proposto envolve busca em profundidade, "backtracking" e a busca da melhor solução é orientada por objetivos ("backward reasoning") escolheu-se a linguagem PROLOG para implementação, considerando que esta linguagem tem em seu motor de inferência as características adequadas.

Devido que a linguagem PROLOG utiliza a lógica como formalismo básico para representar e processar conhecimento [25], torna-se aparentemente muito atrativo seu emprego na implementação da estratégia geral referida anteriormente. Assim, por exemplo, o mecanismo "backtracking" embutido no PROLOG facilita a busca de novas candidatas à melhor solução, se ainda não estiver esgotado o espaço de busca da solução.

PROLOG é uma linguagem de computação baseado em cálculo de predicados de primeira ordem [28]. Assim, um programa em PROLOG corresponde a um conjunto finito de cláusulas. Nesta representação tem-se cláusulas do tipo asserção:

$$B \leftarrow \text{----}$$

do tipo implicação considerado como "hipótese":

$$B \leftarrow \text{----} A_1, A_2, \dots, A_n,$$

e do tipo objetivo ou teorema a demonstrar:

$$\leftarrow \text{----} A_1, A_2, \dots, A_n.$$

PROLOG usa a resolução como mecanismo de inferência [25]. Todas as possíveis aplicações da regra de inferência ao conjunto de cláusulas originais e as que se derivam pela aplicação do mecanismo determinam o "espaço de busca". A pesquisa neste espaço é feita pelo método "top-down". Este é um método baseado em Resolução [36] para percorrer o espaço de busca.

O método "top-down" começa tomando a cláusula objetivo (goal) considerando as condições ("sub-goals") como novos objetivos que devem ser demonstrados.

Uma cláusula de Horn

$$B \leftarrow \text{--} A_1, A_2, \dots, A_n$$



pode ser interpretado como a definição de um "procedimento" de uma linguagem de programação de nome B e corpo (A_1, A_2, \dots, A_n) . O corpo se interpreta como um conjunto de chamadas dos procedimentos A_i .

Então, um programa em lógica consiste em um conjunto de procedimentos em forma de cláusulas de Horn. O programa se ativa a partir da chamada inicial na sentença objetivo. A sequência da execução associa-se às distintas derivações no método de resolução "top-down".

5.2.2. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA

PROLOG é uma linguagem de programação que tem a estrutura de um sistema baseado em regras, possuindo seu próprio mecanismo de inferência baseado no método de resolução. Deste modo as cláusulas podem ser apresentadas na forma de regras.

As estratégias gerais (meta-regras) que regem o algoritmo, expressas em regras, são:

Regra 1. : Determinação de uma solução viável.

Se a partir de um nó-sucessor é possível aprofundar uma subárvore ("depth-first") atendendo em cada nível as



restrições operacionais e de expansão (afastamentos) até, ou iluminar todas as zonas escuras, ou ter declarada todas as chaves, então o estado atingido corresponde a uma solução viável.

Regra 2. : Problema sem solução.

Se não é possível encontrar uma primeira solução viável, então o problema é considerado sem solução.

Regra 3. : Novas soluções viáveis.

Se o espaço de estados ainda não estiver esgotado, então pegar um novo sucessor em procura de novas soluções viáveis.

Regra 4. : Melhor estado final.

Se o espaço de estados estiver esgotado, então a solução candidata do momento será considerada a melhor-solução descrevendo o melhor estado final da rede.

Regra 5. : Troca de solução candidata por carga atendida.

Se encontrada uma solução viável que atenda um número maior de zonas escuras que a solução candidata do momento, então ela torna-se a nova solução candidata à melhor-solução.

Regra 6. : Troca de solução candidata por desbalanceamento.

Se encontrada uma solução que atende um número igual de

zonas escuras que a solução candidata do momento, mas com um menor índice de desbalanceamento, então ela torna-se a nova solução candidata à melhor-solução.

Regra 7. : Afastamentos.

Se para atingir um estado parcial da rede é preciso tomar decisões que desobedeçam a heurística do especialista mais do que o permitido, então o estado deve ser abandonado.

Regra 8. : Sequência ótima.

Se tendo obtido o melhor estado final da rede e todas as chaves estiverem declaradas, então a sequência de chaveamentos que em cada passo permita atender as restrições torna-se a sequência ótima.

A informação relativa à rede elétrica, ou seja, identificação das chaves, seus estados, interligação das zonas de cargas, limites elétricos dos alimentadores, zonas iluminadas, etc. estão colocadas na base de conhecimento como cláusulas do tipo asserção ("fatos"), na forma identidade-relação-valor; assim por exemplo, o alimentador ativo identificado com o disjuntor CH1 com um limite máximo de carregamento de 100 p.u. de potência, será representado por:

- * identidade: alimentador caracterizado pela chave CH1,
- * relação : capacidade,



* valor : magnitude de 100 p.u. de potência,

portanto,

capacidade(1,100).

No contexto do PROLOG o Sistema Reconfigurador tem uma cláusula principal do tipo implicação, chamado "RECONFIGURADOR", composta de quatro condições ou sub-goals:

1. Inicialização;
2. gerar a primeira solução candidata;
3. gerar novas soluções viáveis em procura de novas candidatas;
4. geração da sequência ótima.

O primeiro sub-goal chama uma cláusula INICIA que gerencia a entrada dos dados fornecido pela Etapa Diagnosticadora, estabelece as condições iniciais de cargas nos alimentadores ativos, define o vetor de decisões inicial, verifica as zonas escuras que, topologicamente, são possíveis de ligar.

O segundo sub-goal da cláusula RECONFIGURADOR evoca a cláusula BASICA cujo objetivo é gerar uma solução viável. Esta cláusula será chamada sempre que se desejar gerar soluções viáveis, mas neste ponto a finalidade é obter a primeira solução viável (e definir a primeira solução candidata). A cláusula BASICA está composta por dois sub-

goals:

- * analisar o chaveamento sucessor; se for viável, simular a manobra e atualizar a Base de Dados;

- * preparar a próxima expansão (escolha da próxima chave e geração dos respectivos chaveamentos atendendo o número máximo de afastamentos fora da heurística).

A busca de novas soluções viáveis evoca a cláusula BACK0. Pela sua vez BACK0 chama recursivamente à cláusula BACK1 até esgotar o espaço de busca de novas soluções. BACK1 está composta fundamentalmente pelos seguintes dois sub-goals:

- * gerar nova solução viável;

- * testar se a nova solução viável torna-se na nova solução candidata.

A geração de novas soluções viáveis emprega a cláusula BASICA. O teste da solução candidata consiste em comparar os índices da atual solução candidata com a solução viável que foi gerada.

O último sub-goal da cláusula RECONFIGURADOR consiste na geração da sequência ótima de chaveamentos. Logo após ter satisfeito os sub-goals anteriores é construída a sequência que permite a implementação prática do melhor estado final. Cabe também neste momento informar se o problema da reconfiguração não tem solução, ou seja, se não

é possível iluminar pelo menos uma zona escura.

5.2.3. ETAPA DIAGNOSTICADORA

Foi desenvolvida uma rotina que proporciona automaticamente a localização do defeito e as chaves que devem ser manobradas para o seu isolamento. Além disso, fornece uma lista das zonas escuras ordenadas por carga, suas vizinhas iluminadas e o estado dos alimentadores (cargas e zonas iluminadas por cada um deles) após isolado o defeito (condição inicial do restabelecimento).

A rotina baseia-se no fato da existência de dispositivos detectores de defeito já que o procedimento de localização da zona defeituosa segue a trajetória descrita por aqueles dispositivos.

A etapa diagnosticadora do defeito, que será chamada de Sistema Diagnosticador, se interliga com o Sistema Reconfigurador através de um arquivo de dados que constitui a informação do defeito e o estado da rede após isolado o defeito.

Na Figura 5.1. mostra-se a interligação dos dois sistemas. Os pacotes de cláusulas predefinidas pelo Interpretador-Prolog (PREDEF) e as definidas para o sistema

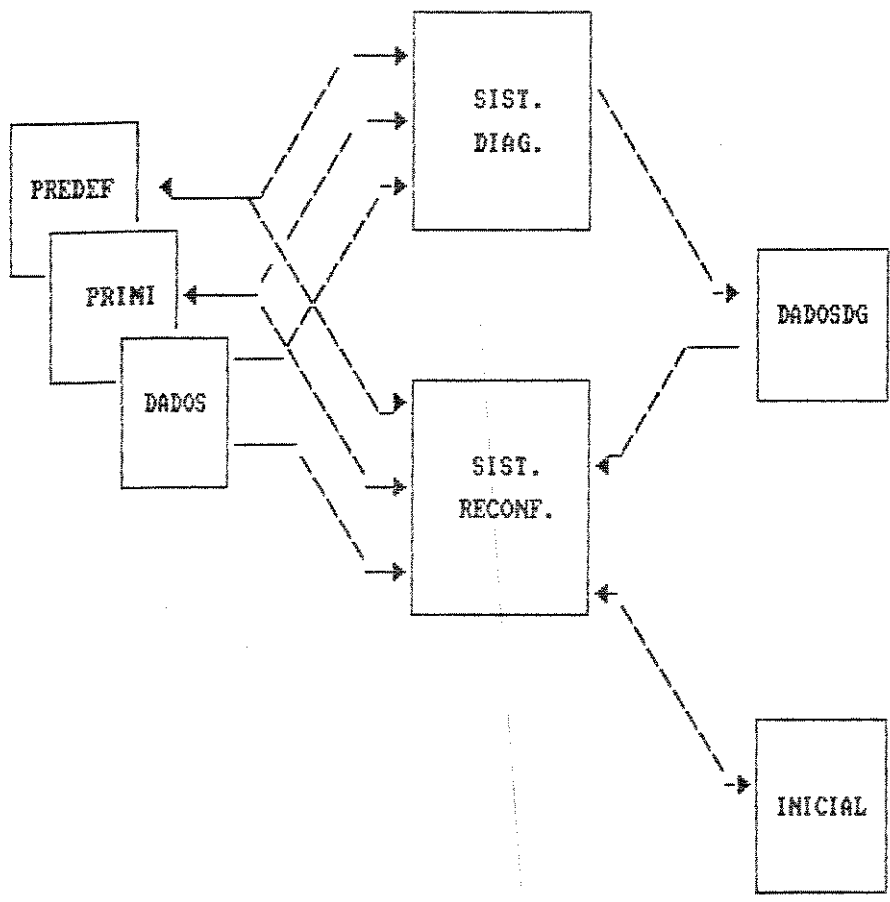


Figura 5.1.: Interligacao dos Sistemas Diagnosticador e Reconfigurador.

elétrico em particular (PRIMI) apóiam a ambos dois sistemas; os dados do sistema elétrico (DADOS) também se ligam aos dois sistemas. Os dados relativos ao defeito e aos estados dos alimentadores após o isolamento são fornecidos pelo Sistema Diagnosticador ao Reconfigurador através do pacote DADOSDG. O Sistema Reconfigurador, além disso, precisa de outro conjunto de cláusulas (INICIAL).

5.3. TESTES E RESULTADOS

Na primeira parte da apresentação dos resultados será destinada à organização das simulações, enquanto que na segunda parte corresponderá à apresentação propriamente dita.

5.3.1. ORGANIZAÇÃO DOS TESTES

As simulações do processo de reconfiguração serão feitas sobre uma rede composta de 4 alimentadores e 33 chaves entre disjuntores (4) e chaves seccionadoras; as cargas estão agrupadas em 20 zonas. Dependendo da configuração topológica e valor dos consumos em condições de pré-falta, tem-se os seguintes casos:

- a) estrutura simétrica e cargas iguais (SI),

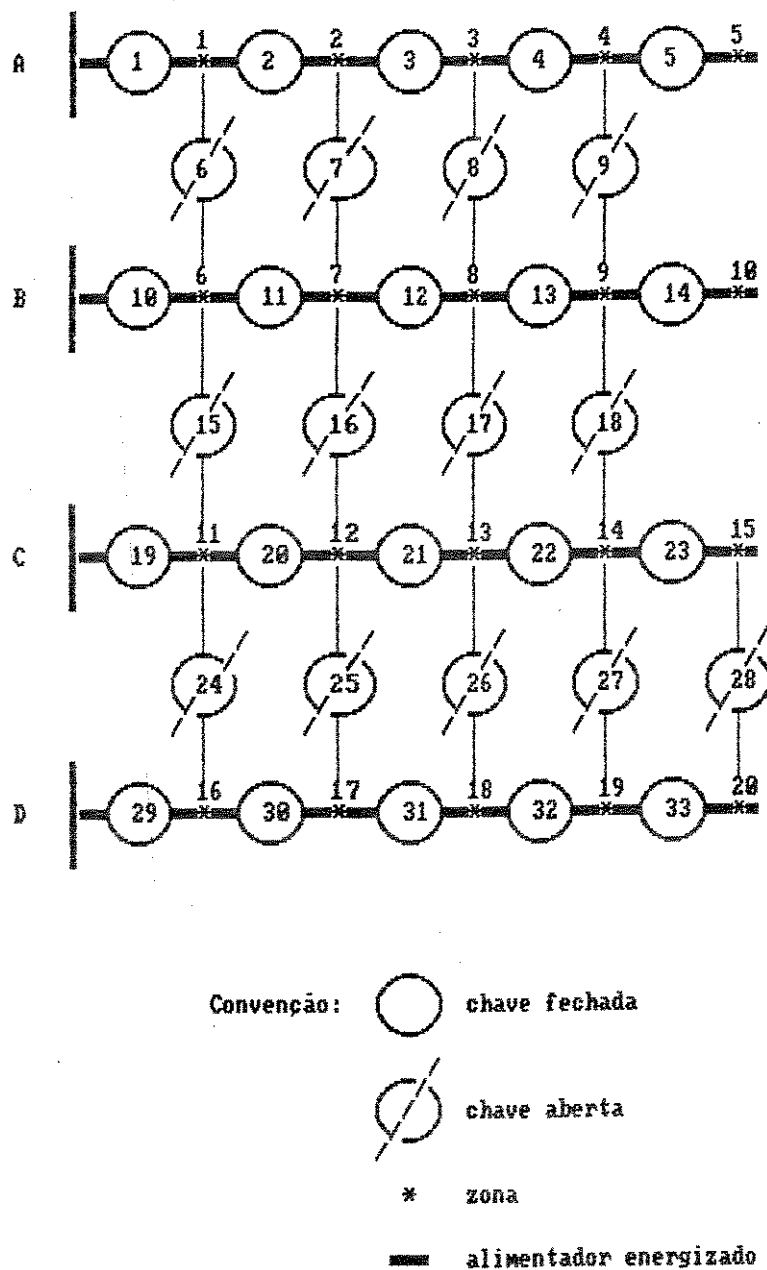


Figura 5.2.(a): Estrutura simétrica da rede-teste.

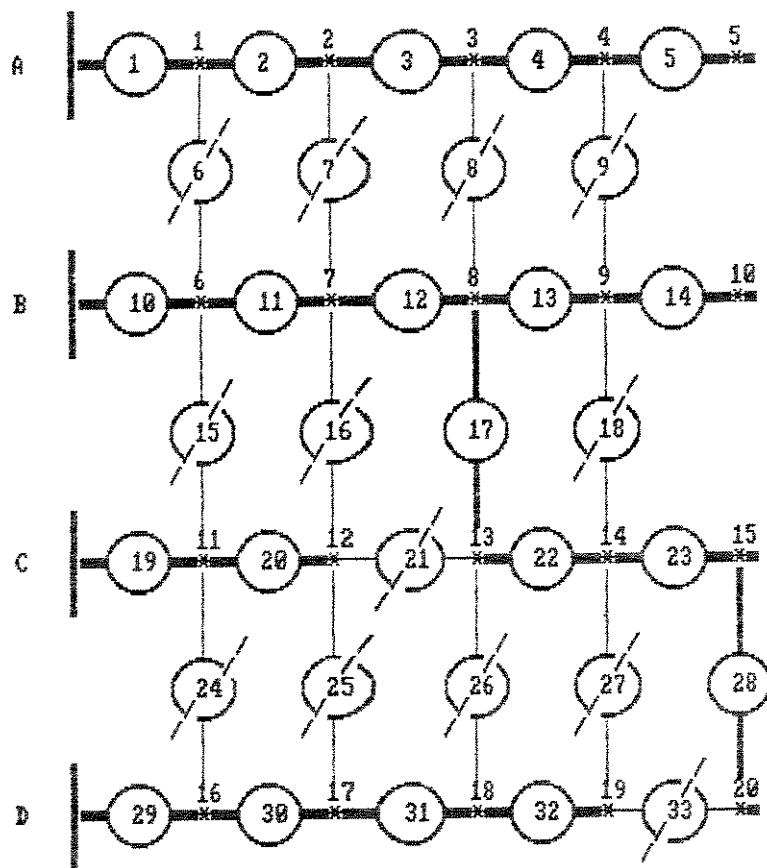


Figura 5.2.(b): Estrutura assimétrica da rede-teste.

Figura 5.2.: Topologias das redes em condições de pré-falta.

- b) estrutura assimétrica e cargas iguais (AI),
- c) estrutura simétrica e cargas distintas (SD),
- d) estrutura assimétrica e cargas distintas (AD).

As topologias das redes dos casos simétricos e assimétricos são mostradas nas Figuras 5.2.(a) e (b).. Os valores das correspondentes cargas que foram utilizadas são apresentados na Tabela 5.1.

Os dados da topologia da rede são organizados em duas tabelas [2] que descrevem a rede a partir das chaves (Tabela de chaves) e das zonas (Tabela de Zonas); as duas contém basicamente os mesmos dados da rede, mas facilitam a

Tabela 5.1.

| ZONAS | CARGAS (p.u.) | |
|-------|---------------|-----------|
| | IGUAIS | DISTINTAS |
| 1 | 10 | 16 |
| 2 | 10 | 7 |
| 3 | 10 | 18 |
| 4 | 10 | 5 |
| 5 | 10 | 19 |
| 6 | 10 | 5 |
| 7 | 10 | 15 |
| 8 | 10 | 10 |
| 9 | 10 | 5 |
| 10 | 10 | 8 |
| 11 | 10 | 30 |
| 12 | 10 | 35 |
| 13 | 10 | 7 |
| 14 | 10 | 10 |
| 15 | 10 | 6 |
| 16 | 10 | 15 |
| 17 | 10 | 20 |
| 18 | 10 | 18 |
| 19 | 10 | 15 |
| 20 | 10 | 5 |

manipulação já que alguns tipos de dados são mais rapidamente obtidos através de uma tabela que em outra. A informação da topologia da rede para os respectivos casos simétrico e assimétrico é apresentada nas tabelas 5.2. e 5.3.. As Tabelas 5.2. (a) e (b) fornecem as seguintes informações sobre cada chave da rede:

- número da chave (SWNB):
- tipo da chave (SOBRK): se SOBRK=1, trata-se de um disjuntor. Se SOBRK=0, de uma chave seccionadora;
- estado original da chave (ORST): estado da chave no início da simulação. Se ORST=0, a chave está fechada. Se ORST=1, a chave está aberta;
- zonas interligadas pela chave (Z1 e Z2): se Z1=0 ou Z2=0, a chave interliga uma zona ao barramento da subestação. Trata-se, portanto, de um disjuntor;
- outras chaves conectadas à zona Z1 (S11,S12,S13): se não há chave, S11=0;
- outras chaves conectadas à zona Z2 (S21,S22,S23): se não há chave, S21=0.

As Tabelas 5.3. (a) e (b) apresentam os dados por zona, como é descrito a seguir:

- número de zona (ZONB):
- estado da zona (ZOST): energizada (ZOST=número do disjuntor do alimentador correspondente);
- carga da zona (ZOLD): carga própria da zona;



- zona que a alimenta (FEZO): se $FEZO=0$, a zona é alimentada diretamente pela barra da subestação;
- chave que a alimenta (FESW);
- outras chaves conectadas à zona (CS1,CS2,CS3): se não há chave, $CSi=0$;
- zonas alimentadas por ela (FZ1,FZ2,FZ3): se não há zona, $FZi=0$.

Os resultados que são mostrados para cada caso apresentam dois tipos de informações. O primeiro corresponde aos resultados obtidos da etapa diagnosticadora do defeito, e o segundo à etapa de reconfiguração a fim de iluminar as zonas escuras.

No que concerne ao diagnóstico, baseado na hipótese da existência de dispositivos detectores de falta, é identificada a zona defeituosa, determina-se as manobras de chaves que devem ser executadas para isolar o defeito e analisa-se a viabilidade de religar o disjuntor do alimentador comprometido. Como saída a etapa diagnosticadora fornece uma lista das zonas escuras (ordenadas por carga), suas vizinhas iluminadas e o estado dos alimentadores imediatamente após isolado o defeito. Esta saída define o estado inicial da rede para o problema da reconfiguração.

Tabela 5.2.(a): TABELA DE CHAVES. REDE SIMÉTRICA.

| SWNB | SOBRK | ORST | Z1 | S11 | S12 | S13 | Z2 | S21 | S22 | S23 |
|------|-------|------|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 6 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 1 | 1 | 6 | 0 | 2 | 3 | 7 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 2 | 2 | 7 | 0 | 3 | 4 | 8 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 3 | 3 | 8 | 0 | 4 | 5 | 9 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 4 | 4 | 9 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 1 | 1 | 1 | 2 | 0 | 6 | 10 | 11 | 15 |
| 7 | 0 | 1 | 2 | 2 | 3 | 0 | 7 | 11 | 12 | 16 |
| 8 | 0 | 1 | 3 | 3 | 4 | 0 | 8 | 12 | 13 | 17 |
| 9 | 0 | 1 | 4 | 4 | 5 | 0 | 9 | 13 | 14 | 18 |
| 10 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | 11 | 15 | 6 |
| 11 | 0 | 0 | 6 | 6 | 10 | 15 | 7 | 7 | 12 | 16 |
| 12 | 0 | 0 | 7 | 7 | 11 | 16 | 8 | 8 | 13 | 17 |
| 13 | 0 | 0 | 8 | 8 | 12 | 17 | 9 | 9 | 14 | 18 |
| 14 | 0 | 0 | 9 | 9 | 13 | 18 | 10 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 1 | 6 | 6 | 10 | 11 | 11 | 19 | 20 | 24 |
| 16 | 0 | 1 | 7 | 7 | 11 | 12 | 12 | 20 | 21 | 25 |
| 17 | 0 | 1 | 8 | 8 | 12 | 13 | 13 | 26 | 21 | 22 |
| 18 | 0 | 1 | 9 | 9 | 13 | 14 | 14 | 27 | 22 | 23 |
| 19 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11 | 15 | 20 | 24 |
| 20 | 0 | 0 | 11 | 15 | 19 | 24 | 12 | 16 | 25 | 21 |
| 21 | 0 | 0 | 12 | 16 | 20 | 25 | 13 | 17 | 22 | 26 |
| 22 | 0 | 0 | 13 | 17 | 21 | 26 | 14 | 18 | 23 | 27 |
| 23 | 0 | 0 | 14 | 18 | 22 | 27 | 15 | 28 | 0 | 0 |
| 24 | 0 | 1 | 11 | 15 | 19 | 20 | 16 | 29 | 30 | 0 |
| 25 | 0 | 1 | 12 | 16 | 20 | 21 | 17 | 30 | 31 | 0 |
| 26 | 0 | 1 | 13 | 17 | 21 | 22 | 18 | 31 | 32 | 0 |
| 27 | 0 | 1 | 14 | 18 | 22 | 23 | 19 | 32 | 33 | 0 |
| 28 | 0 | 1 | 15 | 23 | 0 | 0 | 20 | 33 | 0 | 0 |
| 29 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16 | 24 | 30 | 0 |
| 30 | 0 | 0 | 16 | 24 | 29 | 17 | 25 | 31 | 0 | 0 |
| 31 | 0 | 0 | 17 | 25 | 30 | 0 | 18 | 26 | 32 | 0 |
| 32 | 0 | 0 | 18 | 26 | 31 | 0 | 19 | 27 | 33 | 0 |
| 33 | 0 | 0 | 19 | 27 | 32 | 0 | 20 | 28 | 0 | 0 |



UNICAMP

Tabela 5.2.(b).: TABELA DE CHAVES. REDE ASSIMÉTRICA.

| SWNB | SOBRK | ORST | Z1 | S11 | S12 | S13 | Z2 | S21 | S22 | S23 |
|------|-------|------|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 6 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 1 | 1 | 6 | 0 | 2 | 3 | 7 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 2 | 2 | 7 | 0 | 3 | 4 | 8 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 3 | 3 | 8 | 0 | 4 | 5 | 9 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 4 | 4 | 9 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 1 | 1 | 1 | 2 | 0 | 6 | 10 | 11 | 15 |
| 7 | 0 | 1 | 2 | 2 | 3 | 0 | 7 | 11 | 12 | 16 |
| 8 | 0 | 1 | 3 | 3 | 4 | 0 | 8 | 12 | 13 | 17 |
| 9 | 0 | 1 | 4 | 4 | 5 | 0 | 9 | 13 | 14 | 18 |
| 10 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | 11 | 15 | 6 |
| 11 | 0 | 0 | 6 | 6 | 10 | 15 | 7 | 7 | 12 | 16 |
| 12 | 0 | 0 | 7 | 7 | 11 | 16 | 8 | 8 | 13 | 17 |
| 13 | 0 | 0 | 8 | 8 | 12 | 17 | 9 | 9 | 14 | 18 |
| 14 | 0 | 0 | 9 | 9 | 13 | 18 | 10 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 1 | 6 | 6 | 10 | 11 | 11 | 19 | 20 | 24 |
| 16 | 0 | 1 | 7 | 7 | 11 | 12 | 12 | 20 | 21 | 25 |
| 17 | 0 | 0 | 8 | 8 | 12 | 13 | 13 | 26 | 21 | 22 |
| 18 | 0 | 1 | 9 | 9 | 13 | 14 | 14 | 27 | 22 | 23 |
| 19 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11 | 15 | 20 | 24 |
| 20 | 0 | 0 | 11 | 15 | 19 | 24 | 12 | 16 | 25 | 21 |
| 21 | 0 | 1 | 12 | 16 | 20 | 25 | 13 | 17 | 22 | 26 |
| 22 | 0 | 0 | 13 | 17 | 21 | 26 | 14 | 18 | 23 | 27 |
| 23 | 0 | 0 | 14 | 18 | 22 | 27 | 15 | 28 | 0 | 0 |
| 24 | 0 | 1 | 11 | 15 | 19 | 20 | 16 | 29 | 30 | 0 |
| 25 | 0 | 1 | 12 | 16 | 20 | 21 | 17 | 30 | 31 | 0 |
| 26 | 0 | 1 | 13 | 17 | 21 | 22 | 18 | 31 | 32 | 0 |
| 27 | 0 | 1 | 14 | 18 | 22 | 23 | 19 | 32 | 33 | 0 |
| 28 | 0 | 0 | 15 | 23 | 0 | 0 | 20 | 33 | 0 | 0 |
| 29 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16 | 24 | 30 | 0 |
| 30 | 0 | 0 | 16 | 24 | 29 | 0 | 17 | 25 | 31 | 0 |
| 31 | 0 | 0 | 17 | 25 | 30 | 0 | 18 | 26 | 32 | 0 |
| 32 | 0 | 0 | 18 | 26 | 31 | 0 | 19 | 27 | 33 | 0 |
| 33 | 0 | 1 | 19 | 27 | 32 | 0 | 20 | 28 | 0 | 0 |

Tabela 5.3.(a): TABELA DE ZONAS. REDE SIMÉTRICA.

| ZONB | ZOST | ZOLD | FEZO | FESW | FZ1 | CS1 | FZ2 | CS2 | FZ3 | CS3 |
|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | 1 | 10 | 0 | 1 | 2 | 2 | 0 | 6 | 0 | 0 |
| 2 | 1 | 10 | 1 | 2 | 3 | 3 | 0 | 7 | 0 | 0 |
| 3 | 1 | 10 | 2 | 3 | 4 | 4 | 0 | 8 | 0 | 0 |
| 4 | 1 | 10 | 3 | 4 | 5 | 5 | 0 | 9 | 0 | 0 |
| 5 | 1 | 10 | 4 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 10 | 10 | 0 | 10 | 7 | 11 | 0 | 15 | 0 | 6 |
| 7 | 10 | 10 | 6 | 11 | 8 | 12 | 0 | 7 | 0 | 16 |
| 8 | 10 | 10 | 7 | 12 | 9 | 13 | 0 | 17 | 0 | 8 |
| 9 | 10 | 10 | 8 | 13 | 10 | 14 | 0 | 9 | 0 | 18 |
| 10 | 10 | 10 | 9 | 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | 19 | 10 | 0 | 19 | 12 | 20 | 0 | 15 | 0 | 24 |
| 12 | 19 | 10 | 11 | 20 | 0 | 25 | 0 | 16 | 13 | 21 |
| 13 | 19 | 10 | 12 | 21 | 14 | 22 | 0 | 17 | 0 | 26 |
| 14 | 19 | 10 | 13 | 22 | 15 | 23 | 0 | 18 | 0 | 27 |
| 15 | 19 | 10 | 14 | 23 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16 | 29 | 10 | 0 | 29 | 17 | 30 | 0 | 24 | 0 | 0 |
| 17 | 29 | 10 | 16 | 30 | 18 | 31 | 0 | 25 | 0 | 0 |
| 18 | 29 | 10 | 17 | 31 | 19 | 32 | 0 | 26 | 0 | 0 |
| 19 | 29 | 10 | 18 | 32 | 0 | 27 | 20 | 33 | 0 | 0 |
| 20 | 29 | 10 | 19 | 33 | 0 | 28 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Após resolvido o problema da reconfiguração pelo método proposto fornece-se como saída: o melhor estado final da rede (identificação do alimentador, carga total, zonas que ilumina), a sequência de chaveamentos que conduz a ele, as zonas que não foram possíveis de iluminar e o desbalanceamento atingido (através do índice do desvio-padrão). Também informa-se o número de afastamentos fixado para o caso.

Tabela 5.3.(b): TABELA DE ZONAS. REDE ASSIMÉTRICA.

| ZONB | ZOST | ZOLD | FEZO | FESW | FZ1 | CS1 | FZ2 | CS2 | FZ3 | CS3 |
|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | 1 | 10 | 0 | 1 | 2 | 2 | 0 | 6 | 0 | 0 |
| 2 | 1 | 10 | 1 | 2 | 3 | 3 | 0 | 7 | 0 | 0 |
| 3 | 1 | 10 | 2 | 3 | 4 | 4 | 0 | 8 | 0 | 0 |
| 4 | 1 | 10 | 3 | 4 | 5 | 5 | 0 | 9 | 0 | 0 |
| 5 | 1 | 10 | 4 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 10 | 10 | 0 | 10 | 7 | 11 | 0 | 15 | 0 | 6 |
| 7 | 10 | 10 | 6 | 11 | 8 | 12 | 0 | 7 | 0 | 16 |
| 8 | 10 | 10 | 7 | 12 | 9 | 13 | 13 | 17 | 0 | 8 |
| 9 | 10 | 10 | 8 | 13 | 10 | 14 | 0 | 9 | 0 | 18 |
| 10 | 10 | 10 | 9 | 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | 19 | 10 | 0 | 19 | 12 | 20 | 0 | 15 | 0 | 24 |
| 12 | 19 | 10 | 11 | 20 | 0 | 25 | 0 | 16 | 0 | 21 |
| 13 | 10 | 10 | 8 | 17 | 14 | 22 | 0 | 21 | 0 | 26 |
| 14 | 10 | 10 | 13 | 22 | 15 | 23 | 0 | 18 | 0 | 27 |
| 15 | 10 | 10 | 14 | 23 | 20 | 28 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16 | 29 | 10 | 0 | 29 | 17 | 30 | 0 | 24 | 0 | 0 |
| 17 | 29 | 10 | 16 | 30 | 18 | 31 | 0 | 25 | 0 | 0 |
| 18 | 29 | 10 | 17 | 31 | 19 | 32 | 0 | 26 | 0 | 0 |
| 19 | 29 | 10 | 18 | 32 | 0 | 27 | 0 | 33 | 0 | 0 |
| 20 | 10 | 10 | 15 | 28 | 0 | 33 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Foram simulados defeitos em diversas zonas com diferentes configurações dando origem aos seguintes casos:

1) estrutura simétrica/cargas iguais:

1.1. zona defetiva --- Z3 (S13),

- i.2. zona defeituosa --- Z6 (S16),
- i.3. zona defeituosa --- Z7 (S17),
- i.4. zona defeituosa --- Z14 (S114).

ii) estrutura simétrica/cargas distintas:

- ii.1. zona defeituosa --- Z3 (SD3),
- ii.2. zona defeituosa --- Z6 (SD6),
- ii.3. zona defeituosa --- Z7 (SD7),
- ii.4. zona defeituosa --- Z14 (SD14).

iii) estrutura assimétrica/cargas iguais:

- iii.1. zona defeituosa --- Z3 (A13),
- iii.2. zona defeituosa --- Z6 (A16),
- iii.3. zona defeituosa --- Z7 (A17),
- iii.4. zona defeituosa --- Z15 (A115).

iv) estrutura assimétrica/cargas distintas:

- iv.1. zona defeituosa --- Z3 (AD3),
- iv.2. zona defeituosa --- Z6 (AD6),
- iv.3. zona defeituosa --- Z7 (AD7),
- iv.4. zona defeituosa --- Z15 (AD15).

Nos casos de cargas iguais (estrutura simétrica e assimétrica) foi necessário a utilização de dois afastamentos para achar a solução ótima, enquanto que para cargas distintas (ambas duas estruturas) a primeira solução viável correspondeu à melhor-solução, o que demonstra o bom desempenho da heurística do especialista.

5.3.2. RESUMO DE RESULTADOS

Para uma melhor compreensão dos resultados apresentados, serão definidos alguns termos usados nos relatórios dos testes.

Na Etapa Diagnosticadora o disjuntor referido corresponde ao pertencente ao alimentador comprometido na falta. Se ela acontece no começo do alimentador não será possível a sua religação. As zonas vizinhas ao defeito corresponde às zonas diretamente ligadas a ela indicando-se a chave e estado. As zonas vizinhas às zonas escuras correspondem àquela ligadas diretamente, daí o termo "primeira vizinhança": quando aparecer um zero (0) significa que não existe zona vizinha. Os alimentadores são identificados com o número assinalado a seu disjuntor; as zonas iluminadas por ele são indicadas entre colchetes que corresponde ao símbolo de "lista" usada pela linguagem.

Para a Etapa Reconfiguradora se mostra o limite de afastamentos utilizado na simulação. Na melhor-solução é utilizado o seguinte:

* o estado final dos alimentadores é fornecido em uma estrutura de lista da forma,

```
[[DSJ1,CRG1,[ZILS1]], [DSJ2,CRG3,[ZILS3]],.....]
```

onde, DSJidentificação do alimentador i,
 |
 CRGcarga total do alimentador i,
 |
 ZILS ...zonas iluminadas pelo alimentador i;
 |

- * os chaveamentos que implementam o estado final são fornecidos em listas, onde primeiro corresponde a simulação das manobras que abrem e depois as que fecham (neste caso na ordem indicada);

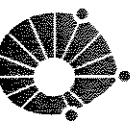
- * zonas escuras corresponde às zonas que não puderam ser iluminadas, indicado-se mediante "nil" que não há zonas escuras;

- * carga atendida corresponde à potência total atendida pelos alimentadores;

- * balanceamento corresponde ao índice de desbalanceamento (desvio padrão) dos alimentadores no final do processo;

- * o tempo proporcionado corresponde ao tempo total (CPU mais tempo gasto no resto das tarefas) da Etapa Reconfiguradora, onde,

time(HORAS,MINUTOS,SEGUNDOS,DEC-SEG).



CASO: 513.

DIAGNOSTICO

```

*****      DEFEITO      *****
zona         : 3
disjuntor    : 1

```

```

***** OPERACAO DE ISOLAMENTO *****
abrir chaves : 3 4 8

```

```

***** RE-LIGACAO DE DISJUNTOR *****
fechar disjuntor 1 : possivel

```

```

***** ZONAS VIZINHAS AO DEFEITO *****
(ligadas diretamente)
zona   chave   estado
  4     4     ligada
  -     8     desligada

```

```

***** ZONAS ESCURAS INDIVIDUAIS *****
zona   carga   primeira vizinhanza
  4     10     [0,5,9,0]
  5     10     [4,0,0,0]

```

```

*****      ALIMENTADORES      *****
alim.   carga   zonas
  1     20     [1,2]
  10    50     [6,7,8,9,10]
  19    50     [11,12,13,14,15]
  29    50     [16,17,18,19,20]

```

RECONFIGURACAO

Numero afastamentos: 2.

MELHOR SOLUCAO

ESTADO-FEEDERS : [[1,20],[1,2]], [19,50],[11,12,13,14,15]], [29,50],[16,17,18,19,20]], [10,70],[5,4,6,7,8,9,10]]]

CHAVEAMENTOS :

```

abrir : nil
fechar : [9]

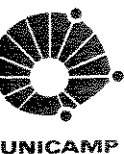
```

ZONAS-ESCURAS : nil

CARGA-ATENDIDA : 190 P.U.

BALANCEAMENTO : 17,9

time(0,4,49,11).



CASO: SI6.

DIAGNOSTICO

```

***** DEFEITO *****
zona      : 6
disjuntor : 10

```

```

***** OPERACAO DE ISOLAMENTO *****
abrir chaves : 10 11 15 6

```

```

***** RE-LIGACAO DE DISJUNTOR *****
fechar disjuntor 10 : impossivel

```

```

***** ZONAS VIZINHAS AO DEFEITO ***
(ligadas diretamente)
zona  chave  estado
7     11     ligada
-     15     desligada
-     6      desligada

```

```

***** ZONAS ESCURAS INDIVIDUAIS *****
zona  carga  primeira vizinhanza
7     10     [0,8,2,12]
8     10     [7,9,13,3]
9     10     [8,10,4,14]
10    10     [9,0,0,0]

```

```

***** ALIMENTADORES *****
alim.  carga  zonas
10     0     nil
1      50    [1,2,3,4,5]
19     50    [11,12,13,14,15]
29     50    [16,17,18,19,20]

```

RECONFIGURACAO

Numero afastamentos: 2.

MELHOR SOLUCAO

```

ESTADO-FEEDERS : [[10,0,nil],[29,50,[16,17,18,19,20]],[1,70,[8,7,1,2,3,4,5]],[19,70,[10,9,11,12,13,14,15]]]
CHAVEAMENTOS   :
                abrir  : [13]
                fechar : [7,18]
ZONAS-ESCURAS : nil
CARGA-ATENDIDA : 190 p.u.
BALANCEAMENTO  : 28.6

```

time(0,4,24,35)



CASO: S17.

DIAGNOSTICO

```
##### DEFEITO #####
zona      : 7
disjuntor : 10
```

```
##### OPERACAO DE ISOLAMENTO #####
abrir chaves : 11 12 7 16
```

```
##### RE-LIGACAO DE DISJUNTOR #####
fechar disjuntor 10 : possivel
```

```
##### ZONAS VIZINHAS AO DEFEITO #####
(ligadas diretamente)
zona  chave  estado
8     12     ligada
-     7      desligada
-     16     desligada
```

```
##### ZONAS ESCURAS INDIVIDUAIS #####
zona  carga  primeira vizinhanza
8     10     [0,9,13,3]
9     10     [8,10,4,14]
10    10     [9,0,0,0]
```

```
##### ALIMENTADORES #####
alim.  carga  zonas
10     10     [6]
1      50     [1,2,3,4,5]
19     50     [11,12,13,14,15]
29     50     [16,17,18,19,20]
```

RECONFIGURACAO

Numero afastamentos: 2.

MALHOR SOLUCAO

```
ESTADO-FEEDERS : [[10,10,[6]], [29,50,[16,17,18,19,20]], [1,60,[8,1,2,3,4,5]], [19,70,[10,9,11,12,13,14,15]]]
CHAVEAMENTOS   :
                abrir : [13]
                fechar : [8,18]
ZONAS-ESCURAS : nil
CARGA-ATENDIDA : 190 p.u.
BALANCEAMENTO  : 22.9
```

time(0,2,50,76)



CASO: SI14.

DIAGNOSTICO

```

***      DEFEITO      ***
zona      : 14
disjuntor : 19

```

```

***** OPERACAO DE ISOLAMENTO *****
abrir chaves : 22 23 18 27

```

```

*** RE-LIGACAO DE DISJUNTOR ***
fechar disjuntor 19 : possivel

```

```

*** ZONAS VIZINHAS AO DEFEITO ***
(ligadas diretamente)
zona  chave  estado
15    23      ligada
-     18      desligada
-     27      desligada

```

```

*** ZONAS ESCURAS INDIVIDUAIS ***
zona  carga  primeira vizinhanza
15    10     [0,0,0,0]

```

```

***      ALIMENTADORES      ***
alim.  carga  zonas
19     30   [11,12,13]
1      50   [1,2,3,4,5]
10     50   [6,7,8,9,10]
29     50   [16,17,18,19,20]

```

RECONFIGURACAO

Numero afastamentos: 2.

MELHOR SOLUCAO

```

ESTADO-FEEDERS : [[19,30,[11,12,13]], [1,50,[1,2,3,4,5]], [10,50,[6,7,8,9,10]], [29,50,[15,16,17,18,19,20]]]
CHAVEAMENTOS   :
                abrir : nil
                fechar : [28]
ZONAS-ESCURAS : nil
CARGA-ATENDIDA : 190 p.u.
BALANCEAMENTO  : 10.9

```

time(0,5,0,38)



CASO: SDS.

DIAGNOSTICO

```

***          DEFEITO          ***
zona          : 3
disjuntor     : 1

```

```

***** OPERACAO DE ISOLAMENTO *****
abrir chaves : 3 4 8

```

```

*** RE-LIGACAO DE DISJUNTOR ***
fechar disjuntor 1 : possivel

```

```

*** ZONAS VIZINHAS AO DEFEITO ***
(ligadas diretamente)
zona  chave  estado
 4      4     ligada
-      8     desligada

```

```

*** ZONAS ESCURAS INDIVIDUAIS ***
zona  carga  primeira vizinhanza
 5     7     [4,0,0,0]
 4     20    [0,5,9,0]

```

```

***          ALIMENTADORES          ***
alim.  carga  zonas
 1     18     [1,2]
 10    60     [6,7,8,9,10]
 19    65     [11,12,13,14,15]
 29    75     [16,17,18,19,20]

```

RECONFIGURACAO

Numero afastamentos: 2.

MELHOR SOLUCAO

```

ESTADO-FEEDERS : [[1,18,[1,2]], [19,65,[11,12,13,14,15]], [29,75,[16,17,18,19,20]], [10,87,[5,4,6,7,8,9,10]]]
CHAVEAMENTOS   :
                abrir  : nil
                fechar : [9]
ZONAS-ESCURAS : nil
CARGA-ATENDIDA : 245 p.u.
BALANCEAMENTO  : 26.2

```

time(0,4,43,14)



CASO: SD6.

DIAGNOSTICO

```

****          DEFEITO          ****
zona           : 6
disjuntor      : 10

```

```

***** OPERACAO DE ISOLAMENTO *****
abrir chaves : 10 11 15 6

```

```

***** RE-LIGACAO DE DISJUNTOR *****
fechar disjuntor 10 : impossivel

```

```

***** ZONAS VIZINHAS AO DEFEITO ***
(ligadas diretamente)
zona   chave estado
7      11   ligada
-      15   desligada
-      6    desligada

```

```

***** ZONAS ESCURAS INDIVIDUAIS *****
zona carga primeira vizinhanza
7      4      [0,8,2,12]
9      8      [8,10,4,14]
8      10     [7,9,13,3]
10     13     [9,0,0,0]

```

```

*****          ALIMENTADORES          ****
alim. carga zonas
10     0     nil
1      57    [1,2,3,4,5]
19     65    [11,12,13,14,15]
29     75    [16,17,18,19,20]

```

RECONFIGURACAO

Numero afastamentos: 2.

MELHOR SOLUCAO

```

ESTADO-FEEDERS : [[10,0,nil],[19,75],[8,11,12,13,14,15]],[29,75],[16,17,18,19,20]],[1,82],[10,9,7,1,2,3,4,5]]]
CHAVEAMENTOS   :
                abrir : [13,12]
                fechar : [7,9,17]
ZONAS-ESCURAS : nil
CARGA-ATENDIDA : 232 p.u.
BALANCEAMENTO  : 33,6

```

time(0,3,41,29)



CASO: S17.

DIAGNOSTICO

```
***          DEFEITO          ***
zona          : 7
disjuntor     : 10
```

```
***** OPERACAO DE ISOLAMENTO *****
abrir chaves : 11 12 7 16
```

```
*** RE-LIGACAO DE DISJUNTOR ***
fechar disjuntor 10 : possivel
```

```
*** ZONAS VIZINHAS AO DEFEITO ***
(ligadas diretamente)
zona  chave  estado
  8     12    ligada
  -     7     desligada
  -     16    desligada
```

```
*** ZONAS ESCURAS INDIVIDUAIS ***
zona  carga  primeira vizinhanza
  9     8     [8,10,4,14]
  8     10    [0,9,13,3]
  10    13    [9,0,0,0]
```

```
***          ALIMENTADORES          ***
alim.  carga  zonas
  10    25    [6]
  1     57    [1,2,3,4,5]
  19    65    [11,12,13,14,15]
  29    75    [16,17,18,19,20]
```

RECONFIGURACAO

Numero afastamentos: 2.

NELHOR SOLUCAO

```
ESTADO-FEEDERS : [[10,25,[6]], [19,75,[8,11,12,13,14,15]], [29,75,[16,17,18,19,20]], [1,78,[10,9,1,2,3,4,5]]]
CHAVEAMENTOS   :
                abrir  : [13]
                fechar : [9,17]
ZONAS-ESCURAS : nil
CARGA-ATENDIDA : 253 p.u.
BALANCEAMENTO  : 22.1
```

time(0,2,29,23)



CASO: SD14.

DIAGNOSTICO

```
***          DEFEITO          ***
zona          : 14
disjuntor     : 19
```

```
***** OPERACAO DE ISOLAMENTO *****
abrir chaves : 22 23 18 27
```

```
*** RE-LIGACAO DE DISJUNTOR ***
fechar disjuntor 19 : possivel
```

```
*** ZONAS VIZINHAS AO DEFEITO ***
(ligadas diretamente)
zona  chave  estado
 15   23     ligada
-    18     desligada
-    27     desligada
```

```
*** ZONAS ESCURAS INDIVIDUAIS ***
zona  carga  primeira vizinhanza
 15    5     [0,0,0,0]
```

```
***          ALIMENTADORES          ***
alim:  carga  zonas
 19    47     [11,12,13]
 1     57     [1,2,3,4,5]
 10    60     [6,7,8,9,10]
 29    75     [16,17,18,19,20]
```

RECONFIGURACAO

Numero afastamentos: 2.

NELHOR SOLUCAO

```
ESTADO-FEEDERS : [[19,47,[11,12,13]], [1,57,[1,2,3,4,5]], [10,60,[6,7,8,9,10]], [29,80,[15,16,17,18,19,20]]]
CHAVEAMENTOS   :
```

```
abrir : nil
fechar : [28]
```

```
ZONAS-ESCURAS : nil
CARGA-ATENDIDA : 244 P.U.
BALANCEAMENTO  : 11,9
```

time(0,3,57,88)



CASO: A13.

DIAGNOSTICO

```

*****          DEFEITO          *****
zona             : 3
disjuntor        : 1

```

```

***** OPERACAO DE ISOLAMENTO *****
abrir chaves : 3 4 8

```

```

***** RE-LIGACAO DE DISJUNTOR *****
fechar disjuntor 1 : possivel

```

```

***** ZONAS VIZINHAS AO DEFEITO *****
(ligadas diretamente)
zona   chave   estado
4      4       ligada
-      8       desligada

```

```

***** ZONAS ESCURAS INDIVIDUAIS *****
zona  carga  primeira vizinhanza
4     10     [0,5,9,0]
5     10     [4,0,0,0]

```

```

*****          ALIMENTADORES          *****
alim.  carga   zonas
1      20     [1,2]
19     20     [11,12]
29     40     [16,17,18,19]
10     90     [6,7,8,9,10,13,14,15,20]

```

RECONFIGURACAO

Numero afastamentos: 2.

MELHOR SOLUCAO

```

ESTADO-FEEDERS : [[1,20,[1,2]], [19,20,[11,12]], [29,40,[16,17,18,19]], [10,110,[5,4,6,7,8,9,10,13,14,15,20]]]
CHAVEAMENTOS   :
                abrir  : nil
                fechar : [9]
ZONAS-ESCURAS : nil
CARGA-ATENDIDA : 190 p.u.
BALANCEAMENTO  : 37,0

```

time(0,3,22,40)



CASO: A16.

DIAGNOSTICO

```
*****
DEFEITO
zona      : 6
disjuntor : 10
```

```
***** OPERACAO DE ISOLAMENTO *****
abrir chaves : 10 11 15 6
```

```
***** RE-LIGACAO DE DISJUNTOR *****
fechar disjuntor 10 : impossivel
```

```
***** ZONAS VIZINHAS AO DEFEITO ***
(ligadas diretamente)
zona  chave  estado
7     11     ligada
-     15     desligada
-     6      desligada
```

```
***** ZONAS ESCURAS INDIVIDUAIS *****
zona  carga  primeira vizinhanza
7     10     [0,8,2,12]
8     10     [7,9,13,3]
9     10     [8,10,4,14]
10    10     [9,0,0,0]
13    10     [8,14,12,18]
14    10     [13,15,9,19]
15    10     [14,20,0,0]
20    10     [15,19,0,0]
```

```
***** ALIMENTADORES *****
elim.  carga  zonas
10     0     nil
19     20    [11,12]
29     40    [16,17,18,19]
1      50    [1,2,3,4,5]
```

RECONFIGURACAO

Numero afastamentos: 1.

MELHOR SOLUCAO

```
ESTADO-FEEDERS : [[10,0,nil],[1,50,[1,2,3,4,5]],[19,60,[10,9,8,7,11,12]],[29,80,[20,15,14,13,16,17,18,19]]]
CHAVEAMENTOS  :
                abrir : [17]
                fechar : [16,26]
ZONAS-ESCURAS : nil
CARGA-ATENDIDA : 190 p.u.
BALANCEAMENTO  : 29.5
```

time(0,5,20,92)



CASO: A17.

DIAGNOSTICO

```

****          DEFEITO          ****
zona           : 7
disjuntor      : 10

```

```

***** OPERACAO DE ISOLAMENTO *****
abrir chaves : 11 12 7 16

```

```

**** RE-LIGACAO DE DISJUNTOR ****
fechar disjuntor 10 : possivel

```

```

**** ZONAS VIZINHAS AO DEFEITO ****
(ligadas diretamente)
zona  chave  estado
  8     12    ligada
  -     7     desligada
  -     16    desligada

```

```

**** ZONAS ESCURAS INDIVIDUAIS ****
zona  carga  primeira vizinhanza
  8     10    [0,9,13,3]
  9     10    [8,10,4,14]
 10     10    [9,0,0,0]
 13     10    [6,14,12,18]
 14     10    [13,15,9,19]
 15     10    [14,20,0,0]
 20     10    [15,19,0,0]

```

```

****          ALIMENTADORES          ****
alim.  carga  zonas
 10     10    [6]
 19     20    [11,12]
 29     40    [16,17,18,19]
 1      50    [1,2,3,4,5]

```

RECONFIGURACAO

Numero afastamentos: 2.

MELHOR SOLUCAO

```

ESTADO-FEEDERS : [[10,10,[6]], [1,60,[8,1,2,3,4,5]], [19,60,[10,9,14,13,11,12]], [29,60,[15,20,16,17,18,19]]]
CHAVEAMENTOS  :
                abrir  : [23,17,13]
                fechar : [21,18,33,8]
ZONAS-ESCURAS : nil
CARGA-ATENDIDA : 190 p.u.
BALANCEAMENTO  : 21,7

```

time(0,14,52,26)



CASO: A115.

DIAGNOSTICO

```
##### DEFEITO #####
zona      : 15
disjuntor : 10
```

```
##### OPERACAO DE ISOLAMENTO #####
abrir chaves : 23 28
```

```
##### RE-LIGACAO DE DISJUNTOR #####
fechar disjuntor 10 : possivel
```

```
##### ZONAS VIZINHAS AO DEFEITO ***
(ligadas diretamente)
zona  chave  estado
 20    28    ligada
```

```
##### ZONAS ESCURAS INDIVIDUAIS #####
zona  carga  primeira vizinhanza
 20    10    [0,19,0,0]
```

```
##### ALIMENTADORES #####
alim.  carga  zonas
 19    20    [11,12]
 29    40    [16,17,18,19]
 1     50    [1,2,3,4,5]
 10    70    [6,7,8,9,10,13,14]
```

RECONFIGURACAO

Numero afastamentos: 2.

MELHOR SOLUCAO

ESTADO-FEEDERS : [[19,20],[11,12]], [29,50],[20,16,17,18,19]], [1,50],[1,2,3,4,5]], [10,70],[6,7,8,9,10,13,14]]

CHAVEAMENTOS :
abrir : nil
fechar : [33]

ZONAS-ESCURAS : nil
CARGA-ATENDIDA : 190 p.u.
BALANCEAMENTO : 17.9

time(0,1,23,65)



CASO: AIG.

DIAGNOSTICO

```
****           DEFEITO           ****
zona           : 3
disjuntor      : 1
```

```
***** OPERACAO DE ISOLAMENTO *****
abrir chaves : 3 4 8
```

```
**** RE-LIGACAO DE DISJUNTOR ****
fechar disjuntor 1 : possivel
```

```
**** ZONAS VIZINHAS AD DEFEITO ***
(ligadas diretamente)
zona  chave  estado
4     4      ligada
-     8      desligada
```

```
**** ZONAS ESCURAS INDIVIDUAIS ****
zona  carga  primeira vizinhanza
4     5      [0,5,9,0]
5     19     [4,0,0,0]
```

```
****           ALIMENTADORES           ****
alim.  carga  zonas
1      23     [1,2]
19     65     [11,12]
29     68     [16,17,18,19]
10     71     [6,7,8,9,10,13,14,15,20]
```

RECONFIGURACAO

Numero afastamentos: 2.

MELHOR SOLUCAO

ESTADO-FEEDERS : [[1,23,[1,2]], [19,65,[11,12]], [29,68,[16,17,18,19]], [10,95,[5,4,6,7,8,9,10,13,14,15,20]]]

CHAVEAMENTOS :

abrir : nil

fechar : [9]

ZONAS-ESCURAS : nil

CARGA-ATENDIDA : 251 p.u.

BALANCEAMENTO : 25.7

time(0,5,19,33)



CASO: AR6

DIAGNOSTICO

```

***          DEFEITO          ***
zona         : 6
disjuntor    : 10

```

```

**** OPERACAO DE ISOLAMENTO ****
abrir chaves : 10 11 15 6

```

```

*** RE-LIGACAO DE DISJUNTOR ***
fechar disjuntor 10 : impossivel

```

```

*** ZONAS VIZINHAS AO DEFEITO ***
(ligadas diretamente)
zona  chave  estado
7     11     ligada
-     15     desligada
-     6      desligada

```

```

*** ZONAS ESCURAS INDIVIDUAIS ***
zona  carga  primeira vizinhanza
9     5      [8,10,4,14]
20    5      [13,19,0,0]
15    6      [14,20,0,0]
13    7      [8,14,12,18]
10    8      [9,0,0,0]
8     10     [7,9,13,3]
14    10     [13,15,9,19]
7     15     [0,8,2,12]

```

```

***          ALIMENTADORES          ***
alim.  carga  zonas
10     0      nil
1      65     [1,2,3,4,5]
19     65     [11,12]
29     68     [16,17,18,19]

```

RECONFIGURACAO

```

numero afastamentos : 1.
indique tipo de configuracao:
      * restabelecimento      (1)
      * redistribuicao-carga (2) = 1.

```

MELHOR SOLUCAO

```

ESTADO-FEEDERS : [[10,0,nil],[19,82,[8,13,11,12]], [1,85,[9,7,1,2,3,4,5]], [29,89,[14,15,20,16,17,18,19]]]
CHAVEAMENTOS   :
                abrir : [22,14,13,12]
                fechar : [7,21,33,9]
ZONAS-ESCURAS : [10]
CARGA-ATENDIDA : 256 p.u.
BALANCEAMENTO  : 37.0

```

time(0,3,53,59)



CASO: AD7

DIAGNOSTICO

```

****      DEFEITO      ****
zona      : 7
disjuntor : 10

```

```

**** OPERACAO DE ISOLAMENTO ****
abrir chaves : 11 12 7 16

```

```

**** RE-LIGACAO DE DISJUNTOR ****
fechar disjuntor 10 : possivel

```

```

**** ZONAS VIZINHAS AO DEFEITO ***
(ligadas diretamente)
zona  chave  estado
8     12     ligada
-     7      desligada
-     16     desligada

```

```

**** ZONAS ESCURAS INDIVIDUAIS ****
zona  carga  primeira vizinhanza
9     5      [8,10,4,14]
20    5      [15,19,0,0]
15    6      [14,20,0,0]
13    7      [8,14,12,18]
10    8      [9,0,0,0]
8     10     [0,9,13,3]
14    10     [13,15,9,19]

```

```

****      ALIMENTADORES      ****
alim.  carga  zonas
10     5      [6]
1      65     [1,2,3,4,5]
19     65     [11,12]
29     68     [16,17,18,19]

```

RECONFIGURACAO

```

numero afastamentos : 1.
indique tipo de reconfiguracao:
      * restabelecimento (1)
      * redistribuicao-carga (2) = 1.

```

MELHOR SOLUCAO

```

ESTADO-FEEDERS : [[10,5,[6]], [29,79,[15,20,16,17,18,19]], [19,82,[14,13,11,12]], [1,88,[10,9,8,1,2,3,4,5]]]
CHAVEAMENTOS   :
                abrir  : [23,17]
                fechar : [8,21,33]
ZONAS-ESCURAS : nil
CARGA-ATENDIDA : 254 p.u.
BALANCEAMENTO  : 33,9

```

time(0,3,44,97)



CASO: AD15.

DIAGNOSTICO

```
***      DEFEITO      ***
zona      : 15
disjuntor : 10
```

```
***** OPERACAO DE ISOLAMENTO *****
abrir chaves : 23 28
```

```
*** RE-LIGACAO DE DISJUNTOR ***
fechar disjuntor 10 : possivel
```

```
*** ZONAS VIZINHAS AO DEFEITO ***
(ligadas diretamente)
zona  chave  estado
20    28     ligada
```

```
*** ZONAS ESCURAS INDIVIDUAIS ***
zona  carga  primeira vizinhanza
20    5      [0,19,0,0]
```

```
***      ALIMENTADORES      ***
alim.  carga  zonas
10     60    [6,7,8,9,10,13,14]
1      65    [1,2,3,4,5]
19     65    [11,12]
29     68    [16,17,18,19]
```

RECONFIGURACAO

Numero afastamentos: 2. ^@

SOLUCAO OTIMA

ESTADO-FEEDERS : [[10,60,[6,7,8,9,10,13,14]], [1,65,[1,2,3,4,5]], [19,65,[11,12]], [29,73,[20,16,17,18,19]]]

CHAVEAMENTOS :
 abrir : nil
 fechar : [33]

ZONAS-ESCURAS : nil
CARGA-ATENDIDA : 263 p.u.
BALANCEAMENTO : 4.7

time(0,4,45,88)



CASO: AD (nenhum afastamento)

RECONFIGURACAO GERAL (Transferencia de carga entre alimentadores)

BALANCEAMENTO INICIAL : 2,449

numero afastamentos : 0.

indique tipo de reconfiguracao:

restabelecimento (1)
redistribuicao-carga (2) = 2.

MELHOR SOLUCAO

ESTADO-FEEDERS : [[1,41],[3,2,1]],[[19,65],[12,11]],[[10,67],[10,5,4,9,8,7,6]],[[29,81],[20,15,14,13,18,17,16]]]

CHAVEAMENTOS :

abrir : [32,17,4]

fechar : [9,26]

ZONAS-ESCURAS : [19]

CARGA-ATENDIDA : 254 p.u.

BALANCEAMENTO : 14,4

time(0,3,2,7)

CASO: AD (um afastamento)

RECONFIGURACAO GERAL (Transferencia de carga entre alimentadores).

numero afastamentos : 1.

indique tipo de reconfiguracao:

restabelecimento (1)
redistribuicao-carga (2) = 2.

BALANCEAMENTO INICIAL : 2,449

MELHOR SOLUCAO

ESTADO-FEEDERS : [[1,65],[5,4,3,2,1]],[[19,65],[12,11]],[[29,68],[19,18,17,16]],[[10,71],[20,15,13,14,10,9,8,7,6]]]

CHAVEAMENTOS :

abrir : [17]

fechar : [18]

ZONAS-ESCURAS : nil

CARGA-ATENDIDA : 269 p.u.

BALANCEAMENTO : 2,449

time(0,16,26,84)



CASO: AD&T

(este caso corresponde ao restabelecimento da energia usando o criterio de reconfigurar tendo declaradas determinadas chaves: as que isolam a zona defeituosa).

RECONFIGURACAO

numero de afastamentos : 1.

indique tipo de reconfiguracao:

* restabelecimento (1)

* redistribuicao-carga (2) 2.

existem CHAB, (s/n) ? : s.

ingresse "lista" CHAB : [6,10,11,15].

ingresse "defeito" : 6.

BALANCEAMENTO INICIAL : 1.4

MELHOR SOLUCAO

ESTADO-FEEDERS : [[19,80,[7,12,11]], [29,90,[20,19,8,13,18,17,16]], [1,94,[15,14,10,9,5,4,3,2,1]]]

CHAVEAMENTOS :

abrir : [28,22,13,12]

fechar : [26,9,16,18,33]

ZONAS-ESCURAS : [6]

CARGA-ATENDIDA : 264 p.u.

BALANCEAMENTO : 5,8

time(0,13,34,59)

(limite eletrico: 120 p.u.)

CAPÍTULO 6

COMENTÁRIOS FINAIS E CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposto um sistema computacional que utiliza o raciocínio humano de um especialista para resolver o problema de restabelecimento de energia de um sistema elétrico de distribuição, depois de ocorrido um defeito permanente. O sistema desenvolvido tem as características de se basear em regras e possuir uma estrutura algorítmica, tendo um enfoque de programação heurística.

O método resultante cumpre plenamente a tarefa proposta no trabalho, qual seja, encontrar uma solução para o problema da reconfiguração que otimize uma função objetivo (no caso, índice de zonas iluminadas e de desbalanceamento) sem realizar busca exaustiva de todas as alternativas.

O algoritmo foi desenvolvido após ter formulado o problema da reconfiguração como um problema de otimização combinatória. Neste enfoque, a solução desejada é a melhor de todas as encontradas uma vez que foi esgotado o espaço de soluções a ser pesquisado.

Apesar de ter sido desenvolvido pensando-se em resolver o problema de reconfiguração de redes de distribuição o método proposto tem características gerais que permitem aplicá-lo com sucesso em outras áreas do conhecimento.

O espaço de soluções é organizado em uma árvore binária de decisões precisando-se de mecanismos de busca, de raciocínio e de retorno para explorar a árvore. O algoritmo utiliza um mecanismo de raciocínio orientado por objetivos ("backward-reasoning").

O algoritmo desenvolvido neste trabalho foi implementado em PROLOG, e a escolha desta linguagem deve-se ao fato que, no início dos trabalhos, pretendia-se construir um sistema especialista baseado no conhecimento que funcionasse como um assistente do operador de sistemas automatizados de distribuição. Desse modo entendia-se que o uso de uma linguagem do tipo declarativa fosse mais conveniente para construir um assistente do operador atuando tanto no diagnóstico de defeitos quanto na reconfiguração da rede.

Porém, a abordagem da reconfiguração como um problema de otimização combinatória, onde pretendia-se obter não uma solução qualquer mas a melhor possível, fez com que a solução do problema tivesse um forte conteúdo procedural,



portanto afastando-se de um contexto somente baseado no conhecimento que caracteriza os sistemas especialistas.

Dessa maneira, a implementação em PROLOG resultou ser inadequada para o algoritmo finalmente proposto principalmente em termos de eficiência computacional. Esta constatação também pode ser considerada uma contribuição acessória deste trabalho, mostrando que problemas que conduzem a uma busca fortemente determinística em um espaço de soluções podem ser resolvidos mais eficientemente com o uso de linguagens procedurais em vez de linguagens declarativas.

A natureza algorítmica do método permite sua programação em outras linguagens com maior eficiência computacional, o que pode contornar eventualmente este problema.

Os testes realizados foram orientados a resolver o problema de restabelecimento de energia mas é de esperar que resultados a serem obtidos nos casos de balaceamento geral de cargas (transferência de carga entre alimentadores), também sejam satisfatórios já que o algoritmo é o mesmo. Isto não foi testado em redes maiores por limitações de memória do interpretador PROLOG usado.

Deixa-se formulada a questão de insistir na procura




futuros o que significaria um ganho na eficiência do algoritmo, pois permitiria diminuir ainda mais o espaço de busca podando caminhos potencialmente pouco atraentes.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NILSON, N.J., "Principles of Artificial Intelligence", Springer-Verley, 1982.
- [2] CASTRO, Jr. C.A., "Reconfiguração Automática de Redes de Distribuição de Energia Elétrica", Tese Mestrado, FEC/UNICAMP, Set/85.
- [3] SAKAGUCHI, T. & MATSUMOTO, K., "Development of a Knowledge Based System for Power System Restoration", IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-102, No. 2, Feb/83, pags. 320/329.
- [4] LIU, CH.CH., LEE, S.J. & VENKATA, S.S., "An Expert System Operational and for Restoration and Loss Reduction of Distribution Systems", IEEE-Proceeding of PICA, 1987, pags. 79/85.
- [5] IEEE COMMITTEE REPORT, "The Distribution System of the Year 2000", IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-101, No.6, Aug/82, pags. 2485/2490.
- [6] REDMON, J.R. & GENTZ C.H., "Affect of Distribution Automation and Control on Future System Configuration", IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-100, No.4, Ap/81, pags. 1923/1931.
- [7] Mc CONNELL, B.W., REDDOCH, T.W. & others, "Distribution Energy Control Center Experiment", IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-102, No.6, pags. Jun/83, 1582/1589.

- 
- [8] BUNCH, J.B., STALDER, H.J. & TENG DIN, J.T., "Reliability Consideration for Distribution Automation Equipment", IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-102, No.8, pags. 2656/2664.
- [9] KITAGAWA, M., "Automated Distribution System (DC Remote Control Systems)", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No.2, Apr/87, pags. 493/501.
- [10] Mc CALL, L.V. & CHAMBERS, B.J., "Defining a Distribution System for Computer-Controlled Distribution Automation", IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS- 102, No.8, Aug/83, pags. 2665/2669.
- [11] SALAMA, M.M.A., MANSOUR, E.A.A. & others, "Control of Reactive Power In Distribution with an 'End-Load Varying Load Condition'", IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-104, No. 4, Ap/85, pags. 941/947.
- [12] IEEE COMMITTEE REPORT, "Var Management Problem Recognition and Control", IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-103, No.8, Aug/84, pags. 2108/2116.
- [13] SALAMA, M.M.A., CHIKHANI, A.Y. & others, "Control of Reactive Power In Distribution with an 'End-Load Fixed Load Condition'", IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-104, No. 10, Oct/85, pags. 2779/2788.
- [14] Mc CALL, L.V. & CHAMBERS, B.J., "Scarborough Distribution Automation Project Implementation and Preliminary Performance Experience", IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-104, No. 10, Oct/85, pags. 2759/2770.
- [15] ROSS, D.W., PATTON, J. & others, "New Methods Distribution Automation and Control (DAC) Systems



- Benefits", IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-100, No.6, Jun/81, pags. 2978/2986.
- [16] MONTICELLI, A.J., Comunicação oral, 1987.
- [17] RIZY, D.T., JEWELL, W.T. & STOVALL, J.P., "Operational and Design Considerations for Electric Distribution Systems with Dispersed Storage and Generation (DSG)", IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-104, No. 10, Oct/85, pags. 2864/2871.
- [18] AOKI, K., ICHIMORI, T. & KANEZASHI, M., "Normal State Optimal Load Allocation in Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No.1, Jan/87, pags. 147/155.
- [19] MONTICELLI, A.J., GARCIA, A.V., FRANÇA, A.L. e outros, "Automação da Distribuição de Energia Elétrica: simulação utilizando fluxo de carga desacoplado rápido", V. Cong. Bras. Automática/1. Cong. Latinoamericano Automática-Campina Grande, 1984.
- [20] PURUCKER, S.L., REDDOCH, T.W, & others, "The Design of an Integrated Distribution Control System", IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-104, No. 3, Mar/85, pags. 745/752.
- [21] CLEMENTS, K.A., LAM, B.P. & others, "Computation of Upper and Lower-Bound on Reliability Indices for Bulck Power System", IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-103, No.8, Aug/84, pags. 2318/2325.
- [22] HAROWITZ, R., NIEVERGERLT, J. & DEO, N., "Fundamentals of Computers Algoritms", Computer Science Press. 1984.



- [23] FRANÇA, A.L., "Controle Automático de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica", UNICAMP, 1986.
- [24] MONTICELLI, A., WU, F.F. & YON, M., "Multiple Bad Data Identification for State Estimation by Combinatorial Optimization", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-1, No. 3, Jul/86, pags. 361/369.
- [25] GASANOVA, M.A., GIORNO, F.A., e FURTADO, A.L., "Programação em Lógica e Linguagem Prolog, Edit. Edgard Blucher Ltda., 1987.
- [26] ARITY CORPORATION, "Arity/Prolog, The Programming Language", Arity Co., 1984.
- [27] ARITY CORPORATION, "The Arity/Prolog, Programming Language", Arity Co., 1986.
- [28] CLOCKSIN, W.F. & MELLISH, C.S., "Programming in Prolog", 2da. Edition, Springer-Verlag, 1984.
- [29] BARRON, D.W., "Recursive Techniques in Programming", Macdonald & Co., 1968.
- [30] REINGOLD, E.M., NIEVERGERLT, J. & DEO, N., "Combinatorial Algorithms. Theory and Practice", Prantice-Hall Inc. 1977.
- [31] FUKUI, CH. & KAWAKAMI, J., "An Expert System for Fault Section Estimation using information from Protective Relays and Circuit Brakers", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-1, No. 4, Oct/86, pags. 83/90.
- [32] HU, T.C., "Combinatorial Algorithms", Addison-Wesley Publishing Company. 1982.
- [33] PODBURY, C.A. & DILLON, T.S., "An intelligent knowledge based system for maintenance scheduling in a power



system", Proceeding of Power System Computation Conference (PSCC), Portugal, 1987.

- [34] HUNT, E.B., "Artificial Intelligence", Academic Press, 1975.
- [35] WINSTON, P.H., "Artificial Intelligence", Addison-Wesley Publishing Co., 1977.
- [36] RICH, E., "Artificial Intelligence", Mc Graw-Hill, 1983.
- [37] CASTRO, Jr. C.A. & FRANÇA. A.L.M., "Automatic Power Distribution Reconfiguration Algorithm Including Operating Constraints", IFAC Symposium on Planning and Operation of Electric Energy Systems, pags. 181/186, Rio de Janeiro, 1985.