



JOSELAINE DE ALMEIDA

**SISTEMA DE APOIO À DECISÃO PARA ELABORAÇÃO
DE PROJETOS DE REDES AÉREAS DE DISTRIBUIÇÃO
DE ENERGIA ELÉTRICA**

**CAMPINAS
2007**



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO**

JOSELAINE DE ALMEIDA

**SISTEMA DE APOIO À DECISÃO PARA ELABORAÇÃO DE
PROJETOS DE REDES AÉREAS DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Orientador: Prof. Dr. Paulo Morelato França

Co-Orientador: Dr. Celso Cavelucci

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestra em Engenharia Elétrica, na área de Automação.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO
DEFENDIDA PELA ALUNA JOSELAINE DE ALMEIDA,
E ORIENTADA PELO PROF. DR. PAULO MORELATO FRANÇA.

**CAMPINAS
2007**

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Elizangela Aparecida dos Santos Souza - CRB 8/8098

AL64s Almeida, Joselaine de, 1981-
Sistema de apoio à decisão para elaboração de projetos de redes aéreas de distribuição de energia elétrica / Joselaine de Almeida. – Campinas, SP : [s.n.], 2007.

Orientador: Paulo Morelato França.

Coorientador: Celso Cavelucci.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Sistemas de suporte de decisão. 2. Distribuição de energia elétrica. 3. Sistemas especialistas (Computação). 4. Redes elétricas. I. França, Paulo Morelato, 1949-. II. Cavelucci, Celso. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Decision support system to design electric power distribution networks projects

Palavras-chave em inglês:

Decision support systems

Electric power distribution

Experts systems (Computer)

Electric networks

Área de concentração: Automação

Titulação: Mestra em Engenharia Elétrica

Banca examinadora:

Paulo Morelato França [Orientador]

Vinicius Jacques Garcia

Christiano Lyra Filho

Data de defesa: 01-10-2007

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidata: Joselaine de Almeida

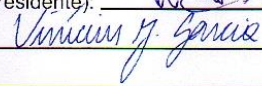
Data da Defesa: 1 de outubro de 2007

Título da Tese: "Sistema de Apoio à Decisão para Elaboração de Projetos de Redes Aéreas de Distribuição de Energia Elétrica"

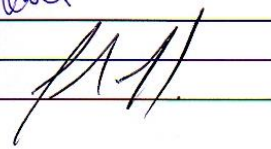
Prof. Dr. Paulo Morelato França (Presidente):



Prof. Dr. Vinicius Jacques Garcia:



Prof. Dr. Christiano Lyra Filho:



*Aos meus pais José e Cida,
ao Rodrigo,
com todo o meu amor.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que, de diferentes maneiras, colaboraram para a realização deste trabalho. Em especial:

- Ao Professor Paulo Morelato França, mais que um orientador, um amigo;
- Ao Dr. Celso Cavelucci por toda contribuição e por me guiar no mundo dos projetos de redes de distribuição;
- Aos meus pais, que me ensinaram o verdadeiro valor da vida;
- Ao meu grande amor Rodrigo, companheiro em todos os momentos;
- Aos amigos e companheiros na realização do projeto de pesquisa: Leonardo, Vinícius, José, José Ermínio e Christiano;
- Aos amigos do DENSIS, DT e DCA: Francisco Cilião, Fábio, Edilson, Ricardo Ceará, Aníbal, Paulo Reis, Gustavo, Fabrício Oliveti, Wilfredo e Olinto;
- Aos amigos Eduardo Yoshimoto e Aline por me receberem tão bem na minha primeira visita ao DENSIS;
- Ao engenheiro Francisco Bassoteli da Companhia Paulista de Força e Luz por ter sido o especialista na elaboração do sistema;
- Ao professor Leandro Nunes por me ajudar a descobrir a magia dos sistemas inteligentes;
- Ao professor Fernando Gomide pela oportunidade de participar do programa de estágio docente;
- Ao René pela ajuda na parte gráfica;
- À Márcia, pela ajuda em todas as etapas;
- À Noêmia e Mazé, sempre dispostas a auxiliar na vida acadêmica;
- À Capes pelo apoio financeiro.

“Na quietude daquela noite, a última, ancorado no infinito sossego da Praia da Espera, sonhando com os olhos abertos e ouvindo outros barcos que também dormiam, descobri que a maior felicidade que existe é a silenciosa certeza de que vale a pena viver.”

Amyr Klink

RESUMO

As concessionárias de energia elétrica devem projetar adequadamente as redes de distribuição, incluindo: definição da localização e capacidade dos transformadores; definição dos traçados de rede primária (15 kV) e de rede secundária (127/220V); e definição e instalação de elementos construtivos, tais como postes, estruturas primárias, estruturas secundárias, transformadores. Projetar estas redes é uma tarefa complexa e demorada que exige amplo conhecimento das normas técnicas e experiência por parte dos projetistas. Neste trabalho é proposto um Sistema de Apoio à Decisão (SAD) para projetos de redes aéreas de distribuição de energia elétrica, englobando as diversas etapas de especificação do projeto. Também é detalhado um sistema especialista para definição dos elementos construtivos (módulo de projeto de execução da rede). Os ganhos potenciais desta abordagem são avaliados em estudos de caso de diversos tipos de projetos. Os principais benefícios da utilização do SAD são: diminuição da dispersão das soluções de projeto; diminuição dos erros; soluções de menor custo e redução no tempo de elaboração dos projetos.

Palavras-chave: sistemas de suporte de decisão, distribuição de energia elétrica, sistemas especialistas, redes elétricas.

ABSTRACT

Electric power companies must design distribution networks, which is a task that includes: the determination of the capacity and position of distribution transformers; the routing of primary feeders (15 kV) and secondary distribution circuits (127/220V); and the selection and installation of constructive elements such as poles, primary structures, secondary structures, street transformers. The design of these networks is a complex and demanding task that requires a great knowledge about technical norms and experience from the network designers. This thesis presents a Decision Support System (DSS) to assist designers to elaborate the several steps of the distribution networks projects specification. An expert system that defines the constructive elements (Network Execution Project module) is also proposed. The advantages of this approach are evaluated through case studies based on different types of projects. The benefits of this DSS are the less variation of project solutions and the reduction of errors, solution costs and completion time.

Keywords: decision support systems, electric power distribution, expert systems, electric networks.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Redes de Distribuição	1
Figura 1.2 - Temas abordados na dissertação	3
Figura 2.1 - Projeto de redes de distribuição	5
Figura 2.2 - Modelo de automação de projeto.....	11
Figura 3.1 - Arquitetura Básica de um SAD	16
Figura 3.2 - Arquitetura de SAD Proposta por Ribeiro et al. (1995)	17
Figura 3.3 - Arquitetura de SADE proposta por Hall (1997)	22
Figura 3.4 - Arquitetura proposta por Fedra (1995) e Feoli (1998)	23
Figura 3.5 - Arquitetura para o SAD para Automação de Projetos de Redes	25
Figura 3.6 - Diagrama de Encadeamento para projetos de ligação de clientes, novos loteamentos e núcleos habitacionais e melhoramento de redes.....	27
Figura 3.7 - Diagrama de Encadeamento para projetos de iluminação pública e alimentadores e ramais.....	29
Figura 3.8 - Diagrama geral de relacionamento entre os módulos	30
Figura 4.1 – Poste de concreto de 9 metros	32
Figura 4.2 – Estruturas primárias de rede nua	33
Figura 4.3 – Amarração laço preformado de topo.....	36
Figura 4.4 – Amarração laço lateral preformado.....	36
Figura 4.5 – Amarração laço lateral duplo preformado.....	37
Figura 4.6 – Encabeçamento normal grampo tensor	37
Figura 4.7 – Encabeçamento normal alça preformada	37
Figura 4.8 – Encabeçamento normal alça preformada olhal	37
Figura 4.9 – Encabeçamento invertido com isolador disco grampo tensor.....	37
Figura 4.10 – Encabeçamento invertido com isolador disco alça preformada	38
Figura 4.11 – Encabeçamento invertido com isolador disco alça preformada olhal	38
Figura 4.12 – Exemplos de estruturas secundárias.....	39
Figura 4.13 – Amarração com alça preformada	40
Figura 4.14 – Amarração com laço preformado de roldana	41
Figura 4.15 – Desenho esquemático de transformador	41

Figura 5.1 - Processo de raciocínio.....	44
Figura 5.2 – Papel do engenheiro do conhecimento (Fonte: Waterman, 1986).....	45
Figura 5.3 – Modelo geral de arquitetura de SE	50
Figura 5.4 – Processo Lógico.....	56
Figura 5.5 – Esquema de decomposição do problema.....	61
Figura 5.6 – Arquitetura básica de um sistema RBC	64
Figura 6.1 – Modelo Incremental.....	73
Figura 6.2 – Modelo Incremental do SE para projeto de execução	74
Figura 6.3 – Divisão dos contextos.....	78
Figura 6.4 - Conjuntos consumidor e transformador	79
Figura 6.5 - Conjuntos estruturas e poste.....	79
Figura 6.6 - Conjuntos equipamentos e aterramento/pára-raios	80
Figura 6.7 - Conjuntos itens avulsos e iluminação pública.....	80
Figura 6.8 - Árvore de decisão para elementos do tipo poste	81
Figura 6.9 - Árvore de decisão para elementos do tipo estrutura primária.....	82
Figura 6.10 - Árvore de decisão para elementos do tipo estrutura secundária	83
Figura 6.11 - Árvore de decisão para elementos do tipo amarração primária	84
Figura 6.12 - Árvore de decisão para elementos do tipo amarração secundária.....	85
Figura 6.13 – Arquitetura do módulo Projeto de Execução.....	89
Figura 6.14 - Estrutura de dados da mensagem	92
Figura 6.15 - Função principal do aplicativo que utiliza API do Windows.....	93
Figura 6.16 - Função para processar as mensagens	93
Figura 6.17 - Função para processar as mensagens do módulo Projeto de Execução	94
Figura 6.18 – Projeto de rede	96
Figura 6.19 – Interface – escolha de elementos físicos.....	96
Figura 6.20 – Interface – elementos físicos inferidos	97
Figura 6.21 – Projeto de teste 1.....	98
Figura 6.22 – Projeto de teste 2.....	100
Figura 7.1 - Estudo de Caso 1: Ligação de Consumidores	104
Figura 7.2 – Árvore de decisão para redes secundárias multiplexadas novas	106
Figura 7.3 – Árvore de decisão para redes secundárias existentes	106

Figura 7.4 - Estudo de Caso 2: Atendimento a pequeno núcleo habitacional	107
Figura 7.5 - Estudo de Caso 3: Atendimento a novo núcleo habitacional.....	110
Figura 7.6 – Rede proposta para o novo núcleo habitacional.....	112
Figura 7.7 – Rede primária da solução proposta para núcleo habitacional	113
Figura 7.8 – Rede secundária proposta para núcleo habitacional.....	113
Figura 7.9 – Rede existente com novos pontos de consumo a ser atendidos	115
Figura 7.10 – Solução proposta para a expansão da rede	116
Figura 7.11 – Rede primária da solução proposta para a expansão da rede	117
Figura 7.12 – Rede secundária proposta para a expansão da rede	117
Figura 7.13 – Árvore de decisão para estrutura primária em rede primária compacta.....	119
Figura 7.14 – Árvore de decisão para estrutura secundária rede secundária multiplexada.....	119
Figura 7.15 – Rede existente com aumento de consumo	120
Figura 7.16 – Solução de melhoramento com troca de transformador de 45 kVA por 75kVA ..	122
Figura 7.17 – Proposta de melhoramento com divisão de circuito	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Tipos de estruturas primárias.....	36
Tabela 4.2 – Tipos de estruturas primárias.....	40
Tabela 5.1 – Definições de SE.....	43
Tabela 6.1 – Tabela de triplas OAV	78
Tabela 6.2 – Informações da rede do projeto de teste 1	99
Tabela 6.3 – Resultados inferidos para a rede do projeto de teste 1.....	99
Tabela 6.4– Informações da rede do projeto de teste 2	101
Tabela 6.5 – Resultados inferidos para a rede do projeto de teste 2.....	102
Tabela 7.1 – Elementos inferidos pelo módulo Projeto de Execução para o Caso 1	105
Tabela 7.2 – Quantidade de fixações e amarrações inferidas pelo módulo Projeto de Execução para o Caso 1	105
Tabela 7.3 – Quantidades dos elementos inferidos no Caso 2	108
Tabela 7.4 – Custo da solução obtida pelo proponente para o Caso 3	113
Tabela 7.5 – Quantidades dos elementos inferidos no Caso 3	114
Tabela 7.6 – Custo da solução obtida pelo proponente para o Caso 4	118
Tabela 7.7 – Quantidades dos elementos inferidos no Caso 4	118
Tabela 7.8 – Custo das soluções obtidas pelo proponente para o Caso 5.....	124

SUMÁRIO

Capítulo 1 - Apresentação	1
1.1. Introdução.....	1
1.2. Escopo deste Trabalho.....	3
Capítulo 2 - Projetos de Redes de Distribuição.....	5
2.1. Projetos de Redes de Distribuição.....	5
2.2. Tipos de Projetos	6
2.2.1. Ligação de Clientes	7
2.2.2. Melhoramentos nas Redes de Distribuição	8
2.2.3. Núcleo Habitacional e Loteamento	9
2.2.4. Iluminação Pública	10
2.2.5. Alimentadores e Ramais	10
2.3. Modelo de Automação.....	11
Capítulo 3 - Sistemas de Apoio à Decisão	13
3.1. Introdução.....	13
3.2. Arquitetura Básica de um SAD	15
3.3. Utilização de Técnicas de IA em Sistemas de Apoio à Decisão	16
3.3.1. SADs e Sistemas Especialistas	17
3.3.2. SADs e Sistemas <i>Fuzzy</i>	17
3.3.3. SADs e Redes Neurais Artificiais	18
3.3.4. SADs e Mineração de Dados.....	19
3.4. Sistemas de Apoio à Decisão Baseados em Otimização	20
3.5. Integração de Sistemas de Informação Geográfica a SADs	20
3.6. SAD de Projeto de Redes de Distribuição.....	24
3.7. Visão Dinâmica do SAD para Projeto de Redes	26
Capítulo 4 - Projeto de Execução da Rede	31
4.1. Introdução.....	31
4.2. Elementos do projeto de execução	31
4.2.1. Poste.....	31

4.2.2. Estrutura primária: definição e fixação	32
4.2.3. Amarração primária	36
4.2.4. Estrutura secundária: definição e fixação	38
4.2.5. Amarração secundária.....	40
4.2.6. Transformador.....	41
4.2.7. Outros elementos.....	42
4.3. Projeto de execução	42
Capítulo 5 - Sistemas Especialistas.....	43
5.1. Introdução	43
5.2. Breve Histórico	45
5.3. Vantagens e Desvantagens dos Sistemas Especialistas	46
5.4. Tipos de Sistemas Especialistas.....	47
5.5. Arquitetura de Sistemas Especialistas.....	50
5.6. Etapas do Desenvolvimento de Sistemas Especialistas	52
5.6.1. Identificação do Problema	52
5.6.2. Aquisição do Conhecimento	53
5.6.3. Representação do conhecimento.....	54
5.6.4. Implementação	59
5.6.5. Verificação e Validação	59
5.7. Sistemas Especialistas Baseados em Regras.....	60
5.8. Outras técnicas	62
Capítulo 6 - Implementação do Sistema Especialista para Projeto de Execução da Rede	67
6.1. Introdução	67
6.2. Projeto conceitual.....	67
6.2.1. Identificação do problema.....	67
6.2.2. Definição do público alvo	69
6.2.3. Definição quanto à utilização de um <i>Shell</i> de sistema especialista.....	69
6.2.4. Definição do mecanismo de inferência e algoritmo de unificação de padrões	71
6.2.5. Definição do modelo de ciclo de vida do sistema.....	72
6.3. Aquisição do conhecimento	74
6.3.1. Leitura de normas técnicas.....	75

6.3.2. Estudos de projetos de execução de rede disponíveis	75
6.3.3. Entrevistas com o especialista	76
6.4. Representação do conhecimento	76
6.4.1. Triplas OAV (Objeto-Atributo-Valor)	77
6.4.2. Árvores de contexto e de decisão	78
6.4.3. Classes	85
6.4.4. Regras	85
6.5. Implementação computacional e integração ao sistema de apoio à decisão para projetos de redes elétricas.....	88
6.5.1. Arquitetura de integração	91
6.5.2. Execução do sistema especialista	95
6.6. Verificação e validação do sistema especialista	97
Capítulo 7 - Estudos de Caso.....	103
7.1. Introdução.....	103
7.2. Caso 1 – Projeto de Ligação de Consumidores	104
7.3. Caso 2 – Projeto de Pequeno Núcleo Habitacional	107
7.4. Caso 3 – Projeto de Novo Núcleo Habitacional	110
7.5. Caso 4 – Projeto de Expansão	115
7.6. Caso 5 – Projeto de Melhoramento	120
Capítulo 8 - Considerações Finais e Trabalhos Futuros	125
8.1. Considerações.....	125
8.2. Trabalhos futuros.....	126
Referências Bibliográficas.....	129

Capítulo 1 - Apresentação

1.1. Introdução

O sistema de distribuição de energia elétrica é constituído da parte do sistema de potência que vai das subestações até os transformadores (sistema de distribuição primário), e destes até a entrada elétrica dos consumidores (sistema de distribuição secundário), conforme ilustrado na Figura 1.1.

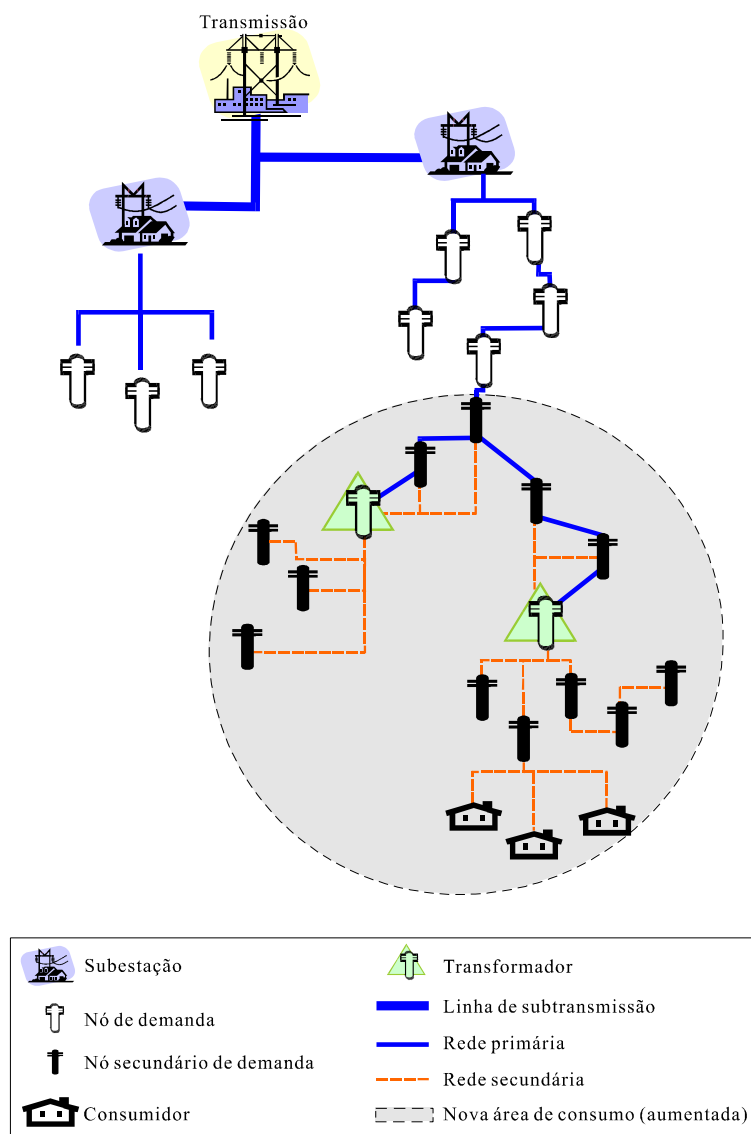


Figura 1.1 - Redes de Distribuição

Redes primárias são formadas por todos os equipamentos compreendidos entre os transformadores das subestações até o primário dos transformadores de distribuição, nos postes das ruas – podem também existir alguns consumidores ligados diretamente à rede primária, recebendo energia em níveis de tensões denominados primários (usualmente em torno de 13,8 kV).

A rede primária é composta de alimentadores e equipamentos com diversas finalidades no sistema. Os alimentadores são os condutores de energia (cabos ou linhas) que partem dos transformadores das subestações e alimentam diretamente, ou por intermédio de seus ramais, os transformadores de distribuição e alguns consumidores. Os equipamentos podem ser de manobra, proteção, correção e transformação, dependendo de suas ações na rede.

Os transformadores de distribuição têm a finalidade de condicionar a tensão para os níveis usuais dos consumidores (no Brasil, geralmente 220 ou 127 V).

As concessionárias de energia elétrica devem efetuar o planejamento adequado das redes de distribuição (definição dos traçados de rede primária, de rede secundária e definição e localização dos transformadores de distribuição) e construir a rede (definição e instalação de elementos de rede).

Projetar redes de distribuição é uma tarefa que exige a reunião de diversas habilidades e conhecimentos. Para se chegar a um bom projeto final precisa-se fazer uso de normas técnicas, procedimentos empíricos, julgamento, bom senso, cálculos e uma considerável massa de dados, resultando numa tarefa complexa e demorada. Por estas características torna-se tanto difícil quanto necessária a construção de uma ferramenta que automatize a elaboração de projetos. Realmente, podem-se obter inúmeros benefícios com o desenvolvimento de um sistema computacional que auxilie o projetista nas diversas etapas de tomada de decisão. Desta forma, apresenta-se a concepção conceitual de um Sistema de Apoio à Decisão para projetos de redes de distribuição e um sistema especialista para a definição dos elementos construtivos da rede.

Na próxima seção delinea-se o escopo deste trabalho.

1.2. Escopo deste Trabalho

A Figura 1.2 ilustra a organização deste trabalho.

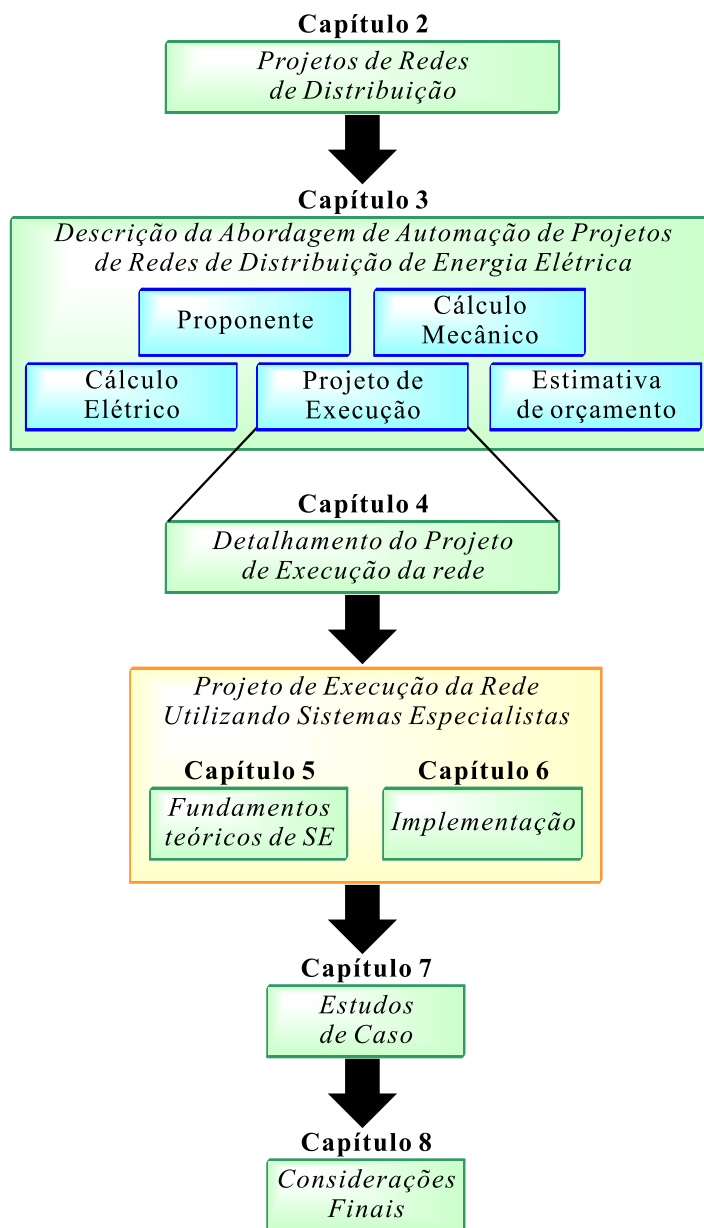


Figura 1.2 - Temas abordados na dissertação

No Capítulo 2 são apresentados os tipos de projetos de redes de distribuição e um modelo que divide a elaboração de projetos em duas etapas: classificação e especificação. O Capítulo 3 apresenta uma proposta conceitual de ferramenta computacional para automação de projetos de redes elétricas de distribuição baseada no conceito de Sistemas de Apoio à Decisão (SAD) para a

etapa de especificação de projeto. A arquitetura proposta divide as atividades de Projeto e Projeto de Execução em vários módulos e provê a comunicação necessária entre estes.

No Capítulo 4 apresenta-se a atividade de projeto de execução da rede e propõe-se sua automação através da implementação de um Sistema Especialista (SE) - foco principal deste trabalho. Os fundamentos teóricos de Sistemas Especialistas são apresentados no Capítulo 5 e os detalhes de implementação e da modelagem do conhecimento encontram-se no Capítulo 6.

Por fim, para avaliação do sistema especialista implementado são descritos alguns estudos de caso no Capítulo 7, considerando a utilização do SE como um módulo do SAD para redes de projetos. No Capítulo 8 têm-se as considerações finais sobre os resultados obtidos neste trabalho.

Capítulo 2 – Projetos de Redes de Distribuição

2.1. Projetos de Redes de Distribuição

A elaboração de um projeto na rede de distribuição deve passar por duas etapas: planejamento e projeto, conforme ilustrado na Figura 2.1.

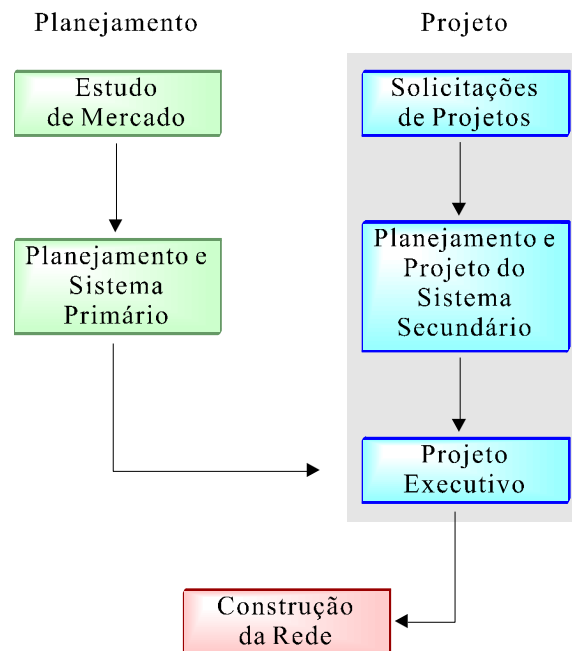


Figura 2.1 - Projeto de redes de distribuição

Na fase de planejamento são realizados estudos de mercado, a fim de definir as necessidades de abastecimento dos consumidores, sua concentração e futuro crescimento de carga na região. Com base nestes estudos e nas características da malha já existente é realizado o planejamento do sistema primário. O planejamento e projeto do sistema secundário (definição do traçado da rede, localização e capacidade dos transformadores e ligação destes com a rede primária) são realizados sob demanda para os diversos tipos de projetos apresentados na Seção 2.2. A partir do planejamento do sistema primário e projeto do sistema secundário, são feitos o projeto de execução (definição dos elementos físicos que irão compor a rede) e, posteriormente, a construção da rede propriamente dita.

Projetar redes de distribuição é uma tarefa que exige a reunião de diversas habilidades e conhecimentos. Para se chegar a um bom projeto final precisa-se fazer uso de normas técnicas,

procedimentos empíricos, julgamento, bom senso, cálculos e uma considerável massa de dados. Deste modo, esta é uma tarefa complexa e demorada.

Iniciando pelas normas técnicas, observa-se que é por meio delas que se estabelecem os procedimentos técnicos e critérios básicos para assegurar as condições técnicas necessárias ao funcionamento do sistema de distribuição e adequar a qualidade de fornecimento exigida pelos órgãos reguladores e de fiscalização. As normas também estabelecem os níveis de segurança compatíveis com as necessidades operacionais da rede. Além das normas técnicas específicas, existem várias outras que complementam ou detalham assuntos pertinentes ao projeto, somando grande quantidade de informação a ser usada, estudada e interpretada pelos projetistas.

Os procedimentos e critérios são aplicados em projetos de construção de alimentadores, extensões de rede primária e secundária, ou ainda, em reformas ou melhorias das redes de distribuição. São também utilizados em ligações novas, projetos de aumento de carga, instalação de iluminação pública e ligações provisórias. De especial complexidade pela sua extensão, os projetos de núcleos habitacionais são dos que mais podem se beneficiar da redução de custos esperada pela utilização de ferramentas computacionais de auxílio a projetos.

Os projetos de rede devem observar o crescimento de carga de cada região. Devem também considerar aspectos estéticos, ecológicos, sociais e de segurança sem, no entanto, comprometer a qualidade do fornecimento de energia elétrica. Todos esses fatores, em maior ou menor grau, competem entre si, exigindo dos projetistas uma complexa busca por soluções de compromisso.

Este capítulo mostra os diversos tipos de projetos existentes (Seção 2.2) e apresenta um modelo conceitual de automação para projetos de rede (Seção 2.3).

2.2. Tipos de Projetos

Os projetos podem ser classificados para adequar tecnicamente as redes ou para expandi-las com o objetivo de atender a solicitação de clientes e o crescimento do mercado [CPFL-GED3668]. A seguir são descritos, sucintamente, cada um dos tipos de projetos considerados neste trabalho.

2.2.1. Ligação de Clientes

Este tipo de projeto inclui todas as ligações isoladas dos diversos tipos de clientes da concessionária. Há uma subdivisão bem própria: ligação de novos clientes e mudança de consumidor existente, com ou sem aumento de carga.

O primeiro caso pode incluir a extensão da rede primária para atendimento de consumidores comerciais e industriais que necessitem de fornecimento em média tensão (13,8 kV), além da ligação de edificações coletivas. Nesta última, pode ocorrer a necessidade de ligação na rede secundária, o que será determinada pelas características da carga. A ligação de novos clientes residenciais ou alguns tipos de consumidores comerciais pode requerer a extensão da rede secundária. O segundo caso refere-se à mudança de local de consumidores existentes, incluindo ou não aumento de carga. Neste tipo de projeto, consideram-se somente clientes de baixo consumo, restritos à rede secundária.

Os procedimentos, segundo a natureza da ligação, são apresentados a seguir.

A) Mudança de local do consumidor sem aumento de carga e com aumento de carga

- Escolher o transformador a ser ligado;
- Acrescentar a este a carga real do consumidor (no caso sem aumento de carga) ou a carga estimada do consumidor (no caso com aumento de carga);
- Retirar a carga do transformador onde o consumidor estava ligado;
- Selecionar a fase de ligação que se apresente menos carregada.

B) Extensão de rede secundária (ligação de um ou mais consumidores)

- Selecionar o transformador em que o consumidor será ligado;
- Definir os condutores e selecionar a fase de ligação;
- Verificar a queda de tensão;
- Verificar a necessidade da troca do transformador de distribuição.

C) Ligações de edificações coletivas

- Definir as tensões de fornecimento em que será ligado o consumidor coletivo (secundária ou misto, secundário-primária);

- Dimensionar os ramais de ligação.

D) Extensão de rede para atender cargas de maior vulto

- Definir local e capacidade do novo transformador de distribuição;
- Definir os circuitos secundários e primários.

E) Ligação de consumidor secundário com carga especial

Considera-se carga especial aparelho de raios-X, motores com carga oscilante e com partidas freqüentes, máquinas de solda, fornos elétricos de indução com compensação por capacitores, retificadores e equipamentos de eletrólise. Como as características de projeto são especiais, tais projetos estão fora do escopo deste trabalho.

F) Ligação de consumidor em tensão primária

Elaborado pelo cliente, aprovado e fiscalizado pela concessionária.

2.2.2. Melhoramentos nas Redes de Distribuição

São projetos para modificar significativamente a rede, alterando sua configuração física e/ou elétrica para atender o crescimento de carga na área, eliminando deficiências técnicas e mantendo os níveis de qualidade; e reforços das estruturas para suportar os esforços devido à ocupação de terceiros (redes de telefonia e TV a cabo). Os projetos de melhoramentos podem ser de melhoria ou de reforma, descritos a seguir.

A) Projeto de Melhoria

São realizados para atender ao plano de ação da rede secundária, reduzindo a queda de tensão e corrigindo o carregamento do transformador de distribuição; atender a reclamações de clientes e ligação de novos clientes. São realizadas alterações na rede, privilegiando o seccionamento de circuitos e a troca do transformador de distribuição.

B) Projeto de Reforma

São realizados para restabelecer as condições físicas dos elementos da rede – cruzetas, postes, condutores, isoladores e isoladores. As ações listadas a seguir são incluídas neste tipo de projeto.

- Balanceamento dos transformadores de distribuição;
- Deslocamento da carga secundária;
- Seccionamento do circuito;
- Instalação de um novo transformador;
- Desmembramento do circuito;
- Redivisão dos circuitos secundários;
- Aumento das bitolas dos condutores;
- Deslocamento ou substituição do transformador.

2.2.3. Núcleo Habitacional e Loteamento

Neste tipo de projeto está prevista a extensão da rede primária e a construção da rede secundária para ligação de um conjunto de novos consumidores residenciais.

Projetos de núcleos habitacionais consideram todas as casas prontas, com ocupação imediata, enquanto que os projetos de loteamentos devem permitir a construção parcial da rede. A expansão é determinada pela evolução da demanda de pedidos de ligação, isentos de custos adicionais para os clientes. Os procedimentos para projetos de núcleos habitacionais e loteamento são listados a seguir.

- Estimar o consumo, e respectiva demanda, por lote;
- Localizar os postes para a sustentação da rede;
- Definir o número, local e capacidade dos transformadores de distribuição a serem instalados;
- Definir os traçados dos circuitos primários e secundários e as bitolas dos condutores;

- Verificar o balanceamento das cargas;
- Verificar as condições elétricas e mecânicas da rede primária e secundária.

2.2.4. Iluminação Pública

Os projetos de iluminação pública têm o objetivo de atender as solicitações para instalação de materiais de iluminação. Eles seguem basicamente os procedimentos listados a seguir:

- Definir o sistema de iluminação pública (unilateral, alternado, oposto, canteiro central e suspensão central);
- Determinar as cargas, definir os elementos do sistema de iluminação pública (lâmpadas e luminárias);
- Definir a seção dos condutores dos ramais.

2.2.5. Alimentadores e Ramais

Todas as ações neste tipo de projeto estão restritas à rede primária. Compreendem a construção de alimentadores expressos, alimentadores urbanos e ramais para ligação de transformadores de distribuição. Eles seguem os procedimentos listados a seguir:

- Faseamento da rede primária;
- Localização para instalação das chaves (fusíveis, facas e seccionadoras trifásicas), bancos capacitores, religadores, reguladores de tensão, etc;
- Verificar a inversão da fonte nas chaves;
- Efetuar cálculo mecânico.

2.3. Modelo de Automação

Considerando a complexidade inerente à elaboração de projetos de redes que atendam aos requisitos mencionados na Seção 2.1, apresenta-se um modelo conceitual para automação de projetos que auxilie os projetistas nas etapas entre o delineamento e o detalhamento técnico necessários à execução dos projetos.

As etapas do processo de elaboração de projetos de rede de distribuição podem ser resumidas em duas fases: Classificação do Projeto e Especificação do Projeto, conforme ilustra o diagrama na Figura 2.2. Estas fases são conduzidas independente da complexidade do projeto, desde a simples ligação de um consumidor até a elaboração da rede elétrica de expansão do sistema.

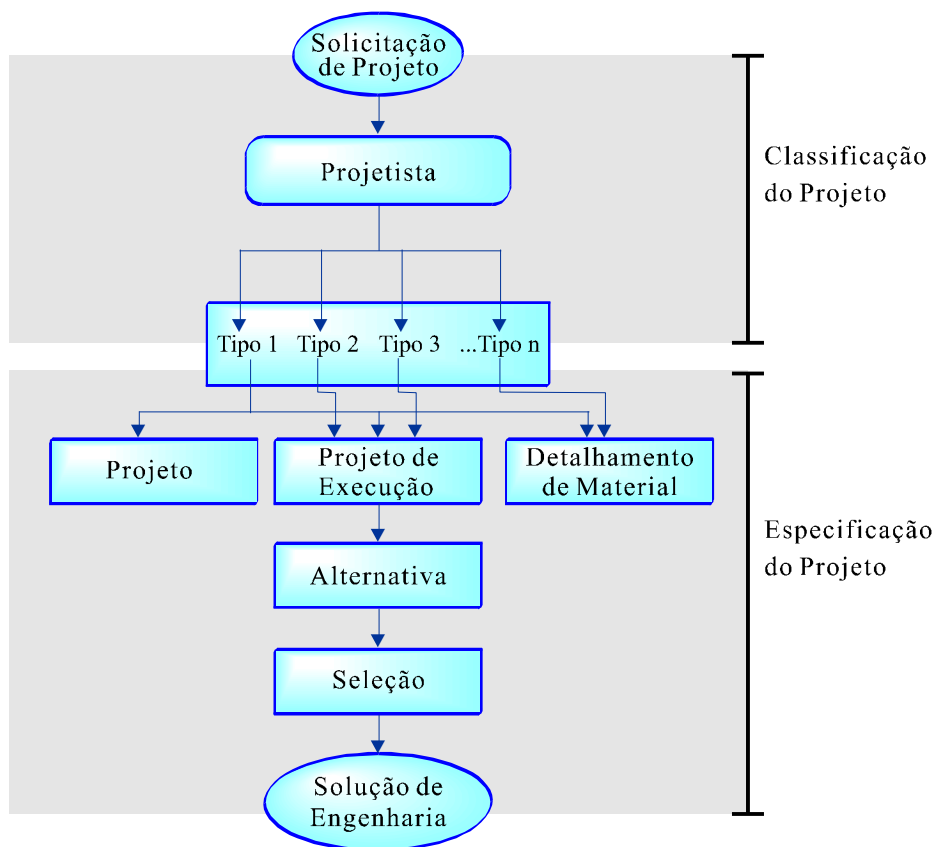


Figura 2.2 - Modelo de automação de projeto

A Classificação do Projeto distingue os vários tipos de projetos a serem especificados. Estes tipos são definidos considerando as características básicas do projeto, resultados de projetos anteriormente elaborados, experiência do projetista, normas e padrões da concessionária e dos órgãos reguladores.

A fase seguinte, Especificação do Projeto, compreende a execução dos procedimentos adequados a cada tipo de projeto. Os procedimentos resumem-se no encadeamento das atividades de Projeto e Projeto de Execução e Detalhamento de Material, com o objetivo de definir alternativas de soluções de engenharia e, posteriormente, indicar a solução que melhor se adequar aos requisitos do projeto.

Com base neste modelo de automação, no Capítulo 3 é apresentada uma proposta conceitual de um Sistema de Apoio à Decisão para a fase de Especificação do Projeto.

Capítulo 3 - Sistemas de Apoio à Decisão

3.1. Introdução

As organizações rotineiramente processam informação, tomam decisões baseadas nestas informações e implementam-nas. Ribeiro *et al.* (1995) caracterizam a tomada de decisão como o processo de selecionar alternativas ou cursos de ação suficientemente bons dentre um conjunto de possibilidades, para alcançar um objetivo ou múltiplos objetivos.

Com os avanços na tecnologia dos computadores e o aumento das facilidades para comunicação, surge uma nova categoria de ferramentas para auxiliar as organizações em suas atividades de tomada de decisão, os Sistemas de Apoio à Decisão (SAD).

O conceito original de Sistema de Apoio à Decisão foi definido por Gorry e Scott-Morton (1971), que integraram as categorias de atividades gerenciais de Anthony (1965) e a descrição dos tipos de decisão de Simon (1960). Para Anthony, a atividade gerencial é constituída de: planejamento estratégico (envolve as decisões relacionadas às metas e missões da empresa, normalmente com horizonte de tempo maior); planejamento tático (envolve a utilização eficiente de recursos em um horizonte de tempo não muito distante) e controle operacional (envolve a distribuição efetiva dos recursos na forma prevista pelo planejamento tático em um horizonte de tempo praticamente imediato).

Simon descreve os problemas de decisão de acordo com seu grau de estruturação, como: programados (rotineiros, repetitivos, bem estruturados, fáceis de resolver) e não-programados (novos, mal estruturados, difíceis de resolver). O mesmo autor resume o processo de tomada de decisão em três fases: Inteligência (definição e classificação do problema); Elaboração (desenvolvimento de alternativas) e Escolha (avaliação das alternativas e escolha de uma para ser implementada).

Gorry e Scott-Morton (1971) passaram a utilizar os termos estruturado, semi-estruturado e não-estruturado para classificar a natureza dos problemas de decisão. Por exemplo, o sistema de contas a receber de uma organização é do tipo estruturado, o *scheduling* da produção é semi-estruturado e a aprovação de um empréstimo é não-estruturado. Problemas não-estruturados são

normalmente resolvidos com o julgamento humano e problemas semi-estruturados necessitam de rotinas automáticas de solução e julgamento humano.

Gorry e Scott-Morton (1971) definiram SAD como um sistema de informação para apoiar o decisor em face de problemas nos quais pelo menos uma das fases é semi-estruturada ou não-estruturada.

Geoffrion (1983) definiu que um SAD deve incluir:

- A capacidade de resolver problemas semi-estruturados e não-estruturados em que os objetivos do decisor e o problema não necessariamente possuem definição precisa e/ou completa;
- Uma interface com o usuário eficiente e simples de usar;
- Facilidades para o usuário combinar modelos analíticos e dados de forma flexível;
- Facilidades para o usuário explorar o espaço de soluções usando modelos do sistema para gerar uma série de alternativas factíveis;
- Capacidade para apoiar uma variedade de estilos no processo de tomada de decisão;
- Abordagens interativas e recursivas para resolução do problema.

Segundo Miranda et al. (2003) a construção de um SAD justifica-se pelas seguintes características: a complexidade do processo decisório; a interação existente entre o SAD e o usuário; a possibilidade do decisor focar sua atenção no problema e não nos métodos de resolução; fornecimento rápido de respostas e a possibilidade de geração de cenários que proporcionarão ao usuário a vantagem de analisar diversas alternativas de solução do problema.

Devido às contribuições dos SADs no processo de tomada de decisão, desde o início da década de 70, sua tecnologia e aplicações têm evoluído significativamente. A pesquisa nesta área teve seu foco em como a tecnologia de informação pode melhorar a eficiência com a qual o usuário toma uma decisão e em como melhorar a eficácia da decisão. Para tal fim, uma arquitetura básica de SAD foi proposta e incluiu-se a utilização de técnicas de áreas como Inteligência Artificial (IA), Pesquisa Operacional (PO) e Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

Nas próximas seções serão detalhadas: a arquitetura básica de um SAD (Seção 3.2); como a utilização das técnicas de IA e PO têm contribuído para sua evolução (Seção 3.3 e 3.4); o uso

de sistemas de informação geográfica para melhorar a qualidade das decisões que envolvam dados espaciais (Seção 3.5); a arquitetura de SAD proposta para a automação de projetos de redes de distribuição de energia elétrica – visão estática (Seção 3.6) e a visão dinâmica do relacionamento entre os diversos módulos que compõem a arquitetura proposta (Seção 3.7).

3.2. Arquitetura Básica de um SAD

Ferramentas baseadas em SAD compreendem componentes para:

- Gerenciamento de banco de dados sofisticados com acesso a dados internos e externos, informação e conhecimento;
- Funções de modelagem acessadas por um sistema gerenciador de modelos;
- Interfaces com o usuário, simples e poderosas, que permitam consultas interativas, relatórios e funções gráficas.

Estes componentes estão organizados numa arquitetura composta de uma base de dados, uma base de modelos e uma interface (diálogo) com o usuário (Sprague e Watson, 1989).

A base de dados é responsável pelo armazenamento, que pode ser local ou remoto, de dados consistentes e importantes para o processo de tomada de decisão. Os dados relevantes são modelados, extraídos, armazenados e controlados por um Sistema Gerenciador de Banco de Dados (SGBD), de forma a garantir a sua segurança, integridade e consistência. Algumas habilidades requeridas em um SGBD são:

- Combinar uma variedade de dados através de processos de captura e extração;
- Adicionar e remover dados de forma rápida e simples;
- Controlar uma ampla variedade de dados utilizando para tal um conjunto completo de funções de gerenciamento.

A base de modelos é construída através de uma série de elementos e suas relações. Um Sistema Gerenciador de Banco de Modelos (SGBM) armazena os modelos e controla os aspectos de integridade e segurança. Algumas características requeridas em um SGBM são:

- Criar novos modelos rapidamente e de forma simples;

- Catalogar e manter uma ampla variedade de modelos, dando suporte a todos os níveis de gerenciamento;
- Inter-relacionar os modelos com o banco de dados.

A interface é definida como uma combinação de software/hardware/pessoas, permitindo a interação entre o usuário e o SAD. Trata-se de um componente muito importante, visto que a maior parte da flexibilidade e da interação amigável de um SAD deriva de uma interface bem projetada - simples e funcional.

Na Figura 3.1 pode ser visualizada a relação entre os elementos da arquitetura de um SAD.

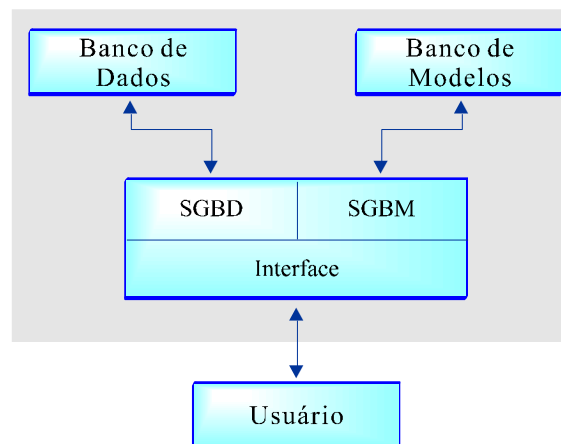


Figura 3.1 - Arquitetura Básica de um SAD

3.3. Utilização de Técnicas de IA em Sistemas de Apoio à Decisão

Os termos SADs Inteligentes foram introduzidos para fazer referência ao uso de técnicas de inteligência artificial para expandir a capacidade dos SADs na resolução de problemas.

Diversas técnicas de IA vêm sendo utilizadas para melhorar o ambiente de tomada de decisão oferecido por um SAD. Dentre elas, temos: sistemas especialistas; lógica *fuzzy*; redes neurais e mineração de dados.

3.3.1. SADs e Sistemas Especialistas

Incorporar conhecimento, na forma de sistemas baseados em regras ou casos, em SADs é uma forma de ganhar vantagens competitivas, formular melhor os processos de resolução de problemas e melhorar a qualidade da decisão (Owens e Philippakis, 1995).

O maior objetivo da integração de um sistema especialista a um SAD é capturar e representar o conhecimento do especialista para poder ajudar os usuários a melhorar sua produtividade e a qualidade das decisões tomadas.

Os sistemas especialistas são utilizados para auxiliar a tomada de decisão em diversos setores: medicina, agricultura, economia, geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, entre outros.

3.3.2. SADs e Sistemas *Fuzzy*

Segundo Bellman e Zadeh (1970) “muito da tomada de decisão no mundo real ocorre em ambientes nos quais os objetivos, as restrições e as conseqüências de possíveis ações não são conhecidos precisamente”. Uma forma de tratar estas incertezas num SAD é através da utilização de lógica *fuzzy*.

Ribeiro et al. (1995) argumentam que um sistema especialista inserido num SAD deve ser capaz de utilizar conhecimento e informações incompletas, inconsistentes e incertas. Para tanto, eles propuseram uma arquitetura de SAD, que pode ser observada na Figura 3.2.

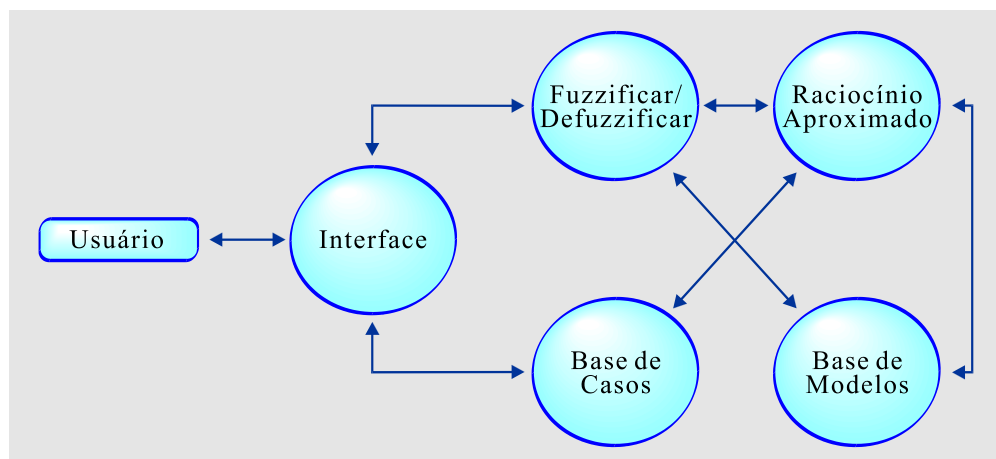


Figura 3.2 - Arquitetura de SAD Proposta por Ribeiro et al. (1995)

A base de casos da Figura 3.2 é constituída de um conjunto de casos já conhecidos que podem ser usados para classificar ou selecionar novos casos. A base de modelos é um conjunto de fatos, estruturas conceituais e definições dos objetos *fuzzy*. O módulo de Raciocínio Aproximado deve ter a capacidade de inferência de conhecimento incompleto e/ou *fuzzy* para estabelecer o ranking das alternativas de resolução do problema. O módulo de “fuzzificação/defuzzificação” envolve um mecanismo responsável pela tradução de conceitos, como por exemplo, caro, barato, alto, em uma representação *fuzzy* apropriada para ser utilizada pelo módulo de Raciocínio Aproximado e também a tradução dos resultados em um formato que o decisor possa compreender.

A seguir são apresentados exemplos de utilização de lógica *fuzzy* em sistemas de apoio à decisão.

Perrot et al (2004) propõe um sistema de apoio à decisão para apoiar operadores on-line do processo de envelhecimento do queijo. Grande parte das fábricas de alimentos não possui o processo totalmente automatizado devido à não-linearidade dos processos e ao acoplamento existente entre as variáveis. Desta forma, os operadores geralmente interagem para avaliar o sabor dos alimentos e/ou ajustar o processo de fabricação. Os autores utilizam lógica *fuzzy* simbólica, baseada na linguagem natural comum aos operadores (por exemplo: seco, úmido) para representar quatro indicadores visuais de sabor: consistência, umidade, cor e capa GC e testam o SAD em uma fábrica padrão e em outra fábrica piloto, submetida a diferentes níveis de temperaturas e umidade do ar. Os testes realizados mostram a eficácia da abordagem para auxiliar a tomada de decisão dos operadores on-line.

Uricchio, Giordano e Lopez (2004) propõem um sistema de apoio à decisão para avaliar o risco de poluição de lençóis de água subterrâneos. Apresentam uma proposta de arquitetura utilizando um sistema especialista em que o conhecimento dos especialistas foi modelado utilizando lógica *fuzzy*, para dar peso aos fatores de risco e também para identificar a probabilidade de ocorrência de cada um dos riscos.

3.3.3. SADs e Redes Neurais Artificiais

Redes Neurais Artificiais têm sido utilizadas para proporcionar apoio a decisões complexas. Uma rede neural artificial é composta de elementos de processamento (neurônios) que recebem entradas, processam-nas e produzem uma saída, a qual pode ser o produto final

(decisão) ou ser utilizada como entrada para outro neurônio. Abaixo são apresentados exemplos da utilização de redes neurais.

Lam (2004) investiga a aplicação de redes neurais para a previsão do desempenho de aplicações financeiras baseadas em ações da bolsa de valores. A rede neural utiliza como fonte de informação para efetuar a previsão 16 atributos financeiros sobre cada empresa e 11 atributos macro-econômicos. Os resultados das aplicações são comparados com a média do mercado (portifólio diversificado) e com o desempenho do conjunto das 33% melhores ações. Os experimentos computacionais indicam que a rede neural produz resultados que sempre superam a média do mercado, apesar de não alcançar o conjunto das melhores ações.

Kiang et al. (2006) aplicam uma rede de Kohonen estendida a uma base de dados dos consumidores da AT&T. O objetivo é segmentar os consumidores em grupos com comportamentos de compra de serviços de longa distância semelhantes. Os atributos utilizados para determinar em que grupo cada consumidor pertence são: uso de meios de comunicação (chamadas de longa-distância, correio, visitas pessoais) e informações demográficas (número de amigos e parentes, número de mudanças de endereço nos últimos cinco anos, número de pessoas com mais de 16 anos na residência, estado civil do chefe de família). Os resultados da rede de Kohonen estendida foram comparados com o procedimento de análise de fatores e *k-means* e apresentaram melhores resultados considerando a variância intragrupos.

3.3.4. SADs e Mineração de Dados

Com o enorme crescimento do volume de dados armazenados pelas organizações, outra técnica de IA bastante explorada em SADs é a mineração de dados, também chamada de exploração de banco de dados ou descoberta de informação e conhecimento. As ferramentas de mineração de dados encontram padrões nos dados e inferem regras a partir deles.

Por exemplo, Kim e Street (2004) utilizam um modelo baseado em redes neurais guiadas por algoritmos genéticos para aprimorar a precisão de ações de marketing por mala-direta. Os objetivos são identificar quais consumidores possuem maior potencial para responder a estes tipos de campanhas e sugerir, para um determinado orçamento, qual deveria ser o escopo da campanha. O modelo é aplicado a uma base de dados composta por quase 10.000 residências européias que potencialmente comprariam seguro automotivo. Os autores concluem que o modelo pode auxiliar gestores a projetar campanhas com maior taxa de acerto.

3.4. Sistemas de Apoio à Decisão Baseados em Otimização

A utilização de modelos de otimização em Sistemas de Apoio à Decisão não é uma prática recente. Contudo, com a evolução das técnicas de Pesquisa Operacional, a integração de modelos de otimização a SADs mostra-se uma abordagem bastante promissora na resolução de problemas de tomada de decisão encontrados em muitas organizações.

Segundo Shim et al. (2002), o apoio à decisão baseado em modelos de otimização pode ser dividido em três estágios: formulação, solução e análise. Na fase de formulação ocorre a geração de um modelo num formato aceito por um resolvidor de modelos. O estágio de solução refere-se à solução algorítmica do modelo. O estágio de análise refere-se à construção de cenários e interpretação de uma solução ou conjunto de soluções.

Neste processo é de importância singular a conversão correta da especificação do problema feita pelo decisor em uma forma algébrica e posteriormente em forma algorítmica.

A fase de solução do modelo pode englobar diversos métodos. Os softwares que utilizam métodos tradicionais de programação linear como Simplex e algoritmos de pontos interiores continuam a serem refinados. Diversos problemas de programação inteira e combinatória são resolvidos de forma eficiente com a utilização de técnicas como programação por restrições e *branch-and-cut* (Caprara e Fishetti, 1997).

Mas, sem dúvida alguma, a maior tendência verificada no desenvolvimento de softwares para tomada de decisão que envolva problemas combinatoriais é a crescente utilização de metaheurísticas (Glover e Laguna, 1997a, Glover e Laguna 1997b, Reeves (1995), Rayward-Smith (1996)).

Shim et al. (2002) acreditam que a combinação de técnicas de inteligência artificial e pesquisa operacional para tratar problemas combinatoriais de larga escala irão contribuir para o desenvolvimento dos SADs nas próximas décadas.

3.5. Integração de Sistemas de Informação Geográfica a SADs

Muitos dos dados usados por organizações têm um ou mais componentes espaciais, como por exemplo: endereços de consumidores, distribuição demográfica dos consumidores e localização de equipamentos.

O processo de tomada de decisão freqüentemente requer uma apropriada interpretação e aplicação destes componentes espaciais. Este fato motivou o desenvolvimento de SADs caracterizados pelos relacionamentos espaciais e geométricos dos dados representando objetos e suas posições no espaço geográfico. Este tipo especial de SAD é conhecido como Sistema de Apoio à Decisão Espacial (SADE).

Muitos problemas espaciais são complexos e mal-estruturados, com múltiplos objetivos e freqüentemente conflitantes. Em adição às características descritas por Geoffrion (1983), apresentadas na Seção 2.1, Densham (1991) inclui quatro capacidades e funções espaciais, como base para arquitetura de um SADE:

- Mecanismos para a entrada de dados espaciais;
- Representação das complexas relações espaciais e estruturas comuns em dados espaciais;
- Inclusão de técnicas de análise espaciais e geográficas;
- Opções de saída incluindo mapas, relatórios e outros tipos mais especializados.

Os especialistas não concebem a existência de um SADE sem a inclusão de elementos ou componentes de um Sistema de Informação Geográfica (SIG), o qual foi desenvolvido como um modo de organizar e analisar dados espaciais (Cooke, 1992). Segundo Densham (1991), SIGs podem ser utilizados para apoiar o processo de tomada de decisão, pois permitem o armazenamento, consultas e visualização de dados espaciais. Entretanto, os SIGs não possuem capacidade de modelagem analítica. Esta deficiência requer o uso de rotinas externas de modelagem e pode ser corrigida com a construção de um SADE.

Crossland et al. (1995) fizeram um estudo no qual submeteram um grupo de pessoas a realizar algumas tarefas que incluíam informação espacial utilizando um SAD (sem a inclusão de SIG) e um SADE (com inclusão de um SIG). Os autores concluíram que a adição da tecnologia SIG reduziu o tempo do processo de tomada de decisão e aumentou a qualidade e eficiência das decisões escolhidas para solucionar a tarefa proposta.

Na literatura técnica são propostas diversas arquiteturas para os SADEs a fim de possibilitar uma integração eficiente entre os SADs e os SIGs. Armstrong e Densham (1990) sugeriram que um SADE deve incluir os seguintes módulos: Sistema Gerenciador de Banco de

Dados, Sistema Gerenciador de Banco de Modelos, gerador de tela, gerador de relatórios e interface com o usuário.

Hall (1997) propôs uma arquitetura baseada nas características propostas por Geoffrion (1983) e Densham (1991), mostrada na Figura 3.3.

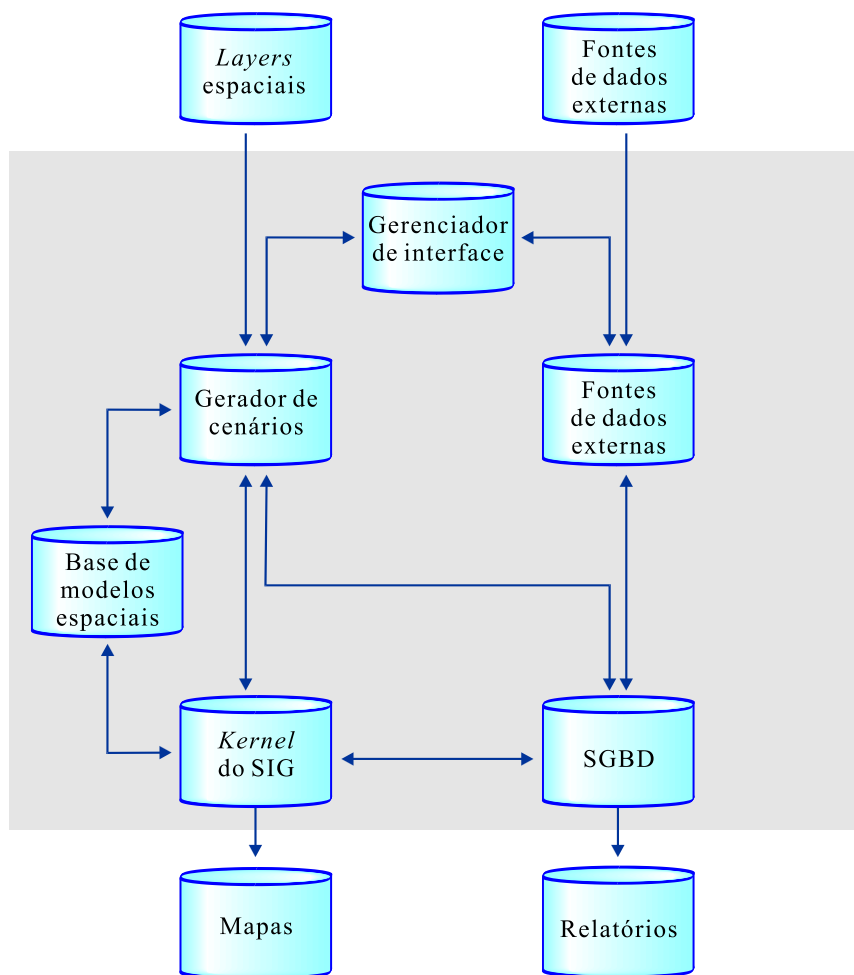


Figura 3.3 - Arquitetura de SADE proposta por Hall (1997)

A arquitetura defendida por Malczewski (1998) é muito similar àquela apresentada na Seção 3.2, com a única particularidade de que o Sistema Gerenciador de Banco de Dados deve conter funções de manipulação de banco de dados geográfico.

Fedra (1995) e Fedra e Feoli (1998) apresentam uma arquitetura para Sistemas de Apoio à Decisão, a qual integra SIG e Sistemas Especialistas, conforme ilustrado na Figura 3.4 e defendem que os SADs podem compreender modelos de otimização e simulação.

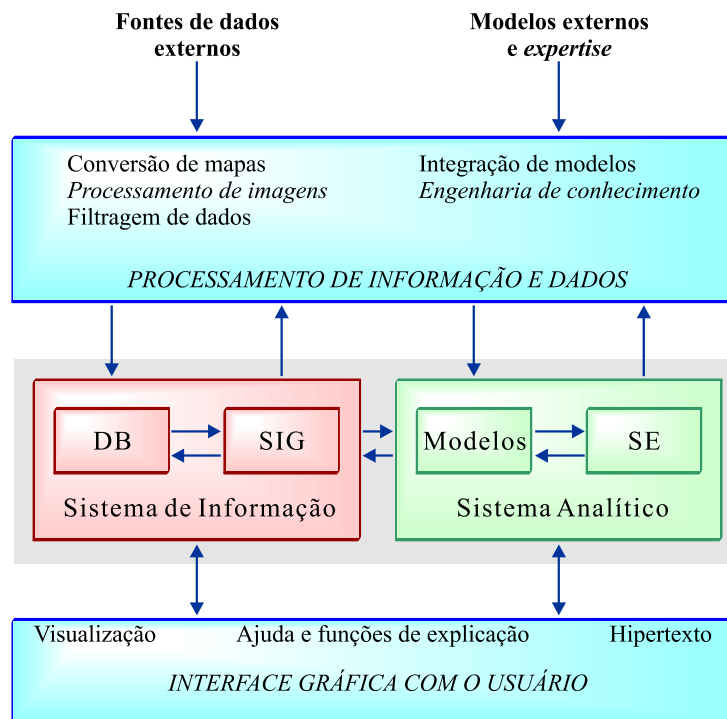


Figura 3.4 - Arquitetura proposta por Fedra (1995) e Feoli (1998)

Um exemplo da utilização de SIG no contexto de SAD pode ser encontrado em Ray (2007), que desenvolveu um sistema de apoio à decisão espacial para o Departamento de Transportes de Delaware para gerenciar a movimentação de veículos acima do comprimento e/ou peso permitidos nas rodovias do estado. Os veículos com estas características necessitam de uma licença especial para trafegar pelas rodovias americanas. Esta licença restringe o tráfego a rotas específicas que suportem suas características físicas e que não estejam congestionadas. A determinação das rotas da licença é um problema essencialmente espacial, pois envolve informações como: endereços de origem e destino dos veículos; fronteira entre estados; localização de pontes e outras estruturas de interesse; localização das equipes de manutenção das rodovias; ocorrência de congestionamentos, acidentes e interdição de pistas, entre outras. O SAD proposto por Ray integra as funções tradicionais de um Sistema de Informação Geográfica a tecnologias de armazenamento de dados e técnicas de otimização (heurísticas baseadas em caminho mínimo) para determinar as rotas da licença de tráfego. Os benefícios resultantes da utilização do sistema foram a melhoria no atendimento ao usuário e a redução do custo do processo para o estado de Delaware.

3.6. SAD de Projeto de Redes de Distribuição

Na concepção de um SAD de projeto de redes de distribuição pode-se disponibilizar para o projetista um conjunto de ferramentas, cada qual específica para um determinado tipo de projeto e capaz de fornecer uma proposta de solução compatível com as normas de projeto e de menor custo possível. Para exemplificar e tomando o caso de projetar um loteamento novo, a ferramenta deve ser capaz de auxiliar o projetista a elaborar um projeto completo de energização, compreendendo entre outras coisas um projeto detalhado da rede secundária e de sua interligação com a rede primária existente.

Esta proposta deve especificar a localização de postes, a localização e a capacidade dos transformadores de distribuição, o traçado dos circuitos secundários, a melhor forma de interconexão à rede primária de alimentação existente, o balanceamento da carga entre as fases, definição das estruturas padronizadas e definição do sistema de iluminação pública. Em um nível mais refinado, a proposta de projeto deve definir os melhores tipos de cabos, de postes e de transformadores; deve também especificar as amarrações, fixações, conexões e ramais, executando os cálculos elétricos (tensão, corrente e perdas) e mecânicos necessários.

A Figura 3.5 apresenta uma proposta de arquitetura geral de um SAD para fase de especificação de projetos de redes.

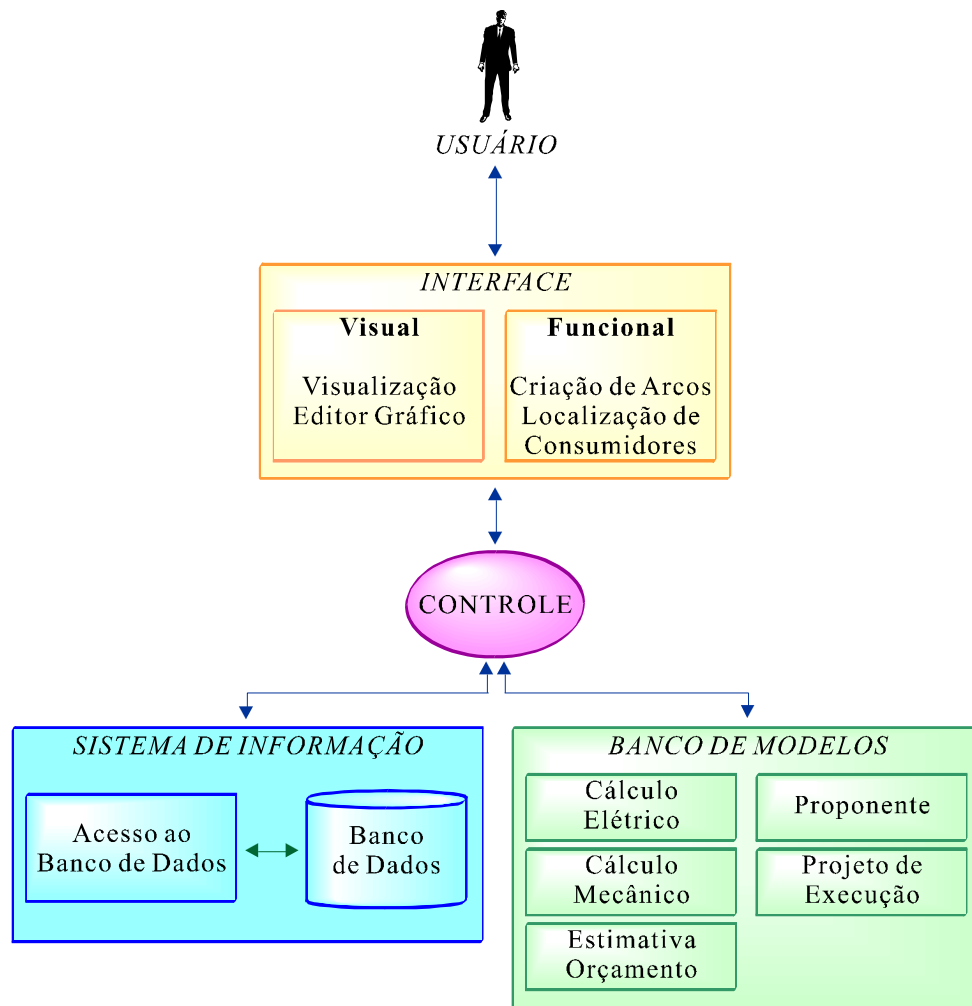


Figura 3.5 - Arquitetura para o SAD para Automação de Projetos de Redes

A Interface tem como objetivo proporcionar a interação entre o usuário e o SAD. Essa interação é tratada pelas funções de visualização e edição gráficas, ambas pertencentes ao módulo visual. O módulo funcional pode incluir funções básicas utilizadas na preparação dos dados de entrada do sistema – criação de arcos e locação de consumidores. A locação de consumidores é feita com base em informações do mapeamento urbano (arruamento e eixos de rua). Os arcos são segmentos de reta que ligam pontos da rede (poste a poste ou poste a cruzamento aéreo), candidatos a serem conectados por cabos primários e/ou secundários.

O Sistema de Informação compreende o banco de dados – que armazena dados sobre os projetos a serem especificados – e o módulo de acesso ao banco de dados, responsável pelas consultas e atualizações.

O banco de modelos é composto pelos módulos: Proponente; Projeto de Execução; Cálculo Elétrico; Cálculo Mecânico e Estimativa de Orçamento, com os quais é possível auxiliar o decisor na elaboração de projetos de redes de distribuição.

O módulo Proponente define a localização e capacidade dos transformadores de distribuição, o traçado dos circuitos secundários e da interligação com a rede primária (ramal) existente ou projetada, o tipo e a bitola dos condutores primários e secundários. O processo de busca por soluções é orientado por critérios econômicos que compreendem a minimização do custo dos equipamentos e das perdas elétricas nos condutores secundários. A abordagem de resolução utilizada pelo módulo Proponente foi desenvolvida em Costa et al. (2004) e ampliada por Garcia et al. (2004).

O módulo Cálculo Elétrico verifica se as soluções encontradas no processo de busca utilizado no módulo Proponente satisfazem as restrições de caráter elétrico, tais como capacidades dos equipamentos, queda de tensão e fluxo de carga.

O módulo Projeto de Execução estabelece as características construtivas de cada um dos elementos da rede de distribuição (poste, estruturas, amarrações, fixações) e será descrito em detalhes nos próximos capítulos.

O módulo Cálculo Mecânico efetua os dimensionamentos mecânicos da posteação e estaiamento de subsolo com base nos esforços solicitantes da rede elétrica e ocupação por terceiros, tais como empresas de telefonia, tv a cabo, etc. No caso da rede elétrica, as informações necessárias são obtidas a partir do próprio banco de dados do sistema. Para redes de terceiros devem ser fornecidos pelo usuário, ponto a ponto, as resultantes, ângulo de aplicação e altura.

O módulo Estimativa de Orçamento fornece uma estimativa do custo do projeto baseado nos elementos construtivos definidos para a rede.

Esta arquitetura geral é a visão estática dos relacionamentos entre os módulos, sem apresentar detalhes da interação dinâmica existente durante a execução do sistema.

3.7. Visão Dinâmica do SAD para Projeto de Redes

A visão dinâmica do SAD para projetos de redes é representada por diagramas que ilustram o encadeamento da execução dos módulos, apresentados a seguir. A Figura 3.6 mostra o

diagrama de encadeamento definido para os projetos de ligação de clientes, novos loteamentos/núcleos habitacionais e melhoria de redes.

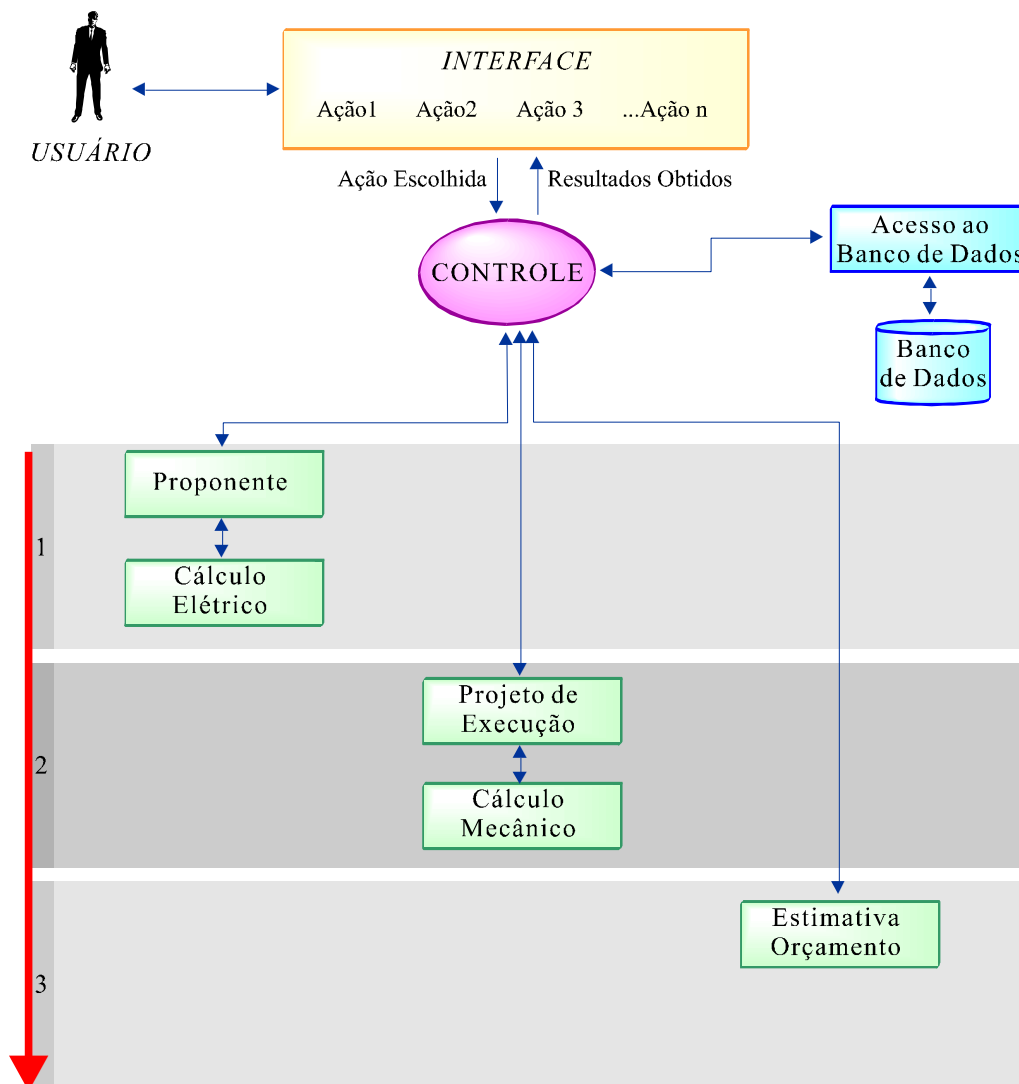


Figura 3.6 - Diagrama de Encadeamento para projetos de ligação de clientes, novos loteamentos e núcleos habitacionais e melhoria de redes.

Após o usuário classificar o projeto no tipo adequado e preparar os dados de entrada, a base de dados deve ser atualizada com as informações sobre a rede existente e deve-se registrar esta ação no módulo de controle. O Controle acionará o módulo Proponente, que necessitará interagir com o módulo Cálculo Elétrico para obter valores de queda de tensão e de fluxo de carga. O resultado obtido pelo módulo proponente deve ser devolvido ao controle e inserido no

banco de dados. Na sequência, o Controle acionará o módulo Projeto de Execução, que, para definir determinados elementos de rede, necessita de valores provenientes da execução do módulo Cálculo Mecânico. O módulo Projeto de Execução devolve os resultados ao Controle, que os armazena no banco de dados. Os resultados do processo de encadeamento acima descrito são as informações sobre o projeto, armazenadas no banco de dados, que podem visualizadas por meio da interface gráfica.

Vale ressaltar que o usuário poderá, através do módulo visual da interface, realizar modificações no projeto e estas serão armazenadas no banco de dados.

Para projetos de iluminação pública (IP), alimentadores e ramais o diagrama de encadeamento descrito acima não é adequado, uma vez que não há necessidade de determinar o projeto elétrico da rede. Em projetos de IP o usuário deverá prever os pontos da rede que receberão os equipamentos de iluminação. Para cada um destes pontos, deve definir o tipo de luminária a ser instalada e o tipo de braço de iluminação. Depois de concluídas estas definições, o sistema pode encadear os módulos necessários para elaboração do projeto. Em projetos de alimentadores e ramais, a definição do traçado dos alimentadores e ramais é um dado de entrada para o sistema, obtido junto ao planejamento. Cabe ao SAD a definição das características construtivas dos alimentadores. Para ambos os casos de projeto têm-se o diagrama de encadeamento ilustrado na Figura 3.7.

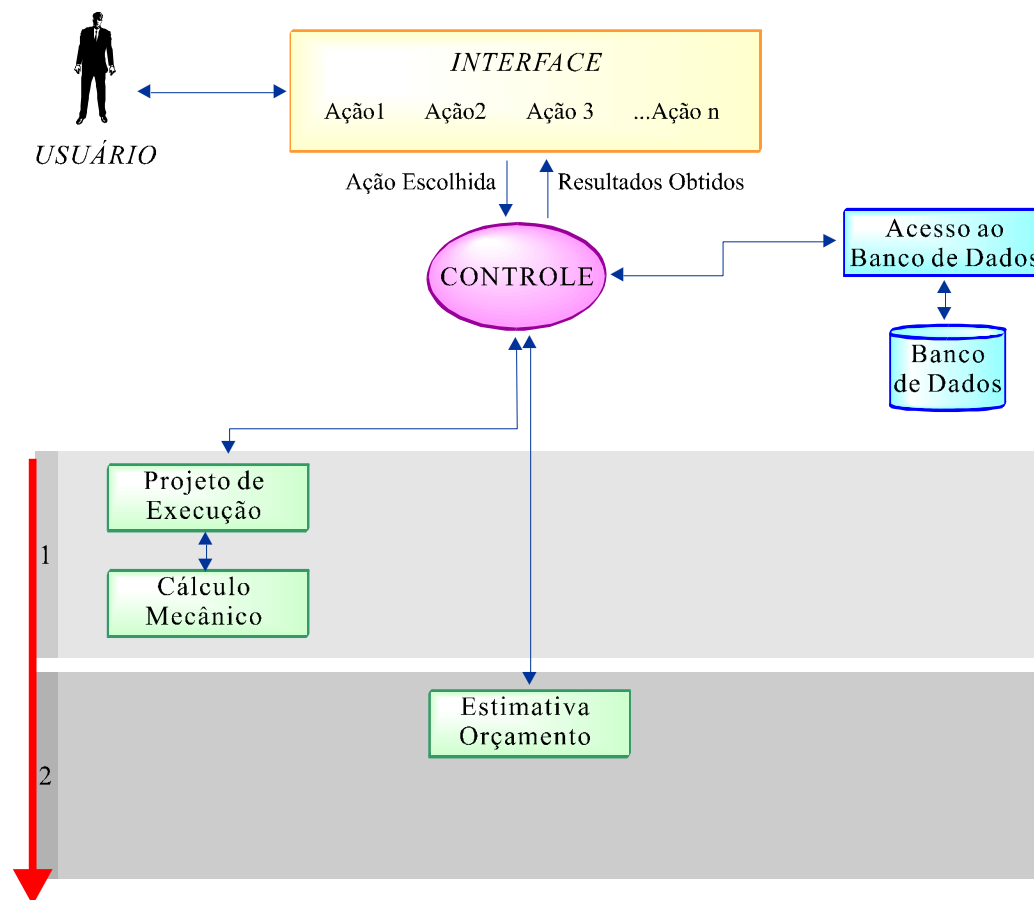


Figura 3.7 - Diagrama de Encadeamento para projetos de iluminação pública e alimentadores e ramais

Além destes dois modelos de encadeamento para projetos, deve ser disponibilizada ao usuário a utilização direta de qualquer um dos módulos do sistema, bastando para tal a correta definição dos dados de entrada necessários ao funcionamento do módulo. Desta forma, o projetista pode fazer projetos ou parte destes, e utilizar o sistema para realizar simulações ou complementar o projeto. Por exemplo, o sistema deve permitir, entre outras coisas, a simulação do efeito do aumento de demanda nas condições elétricas da rede e em sua configuração ou do impacto mecânico causado na rede pelo atendimento de serviços de terceiros ou o ganho obtido em redução de perdas por diferentes projetos de melhoramento.

Na Figura 3.8 é mostrado o diagrama do relacionamento dinâmico entre os módulos, acionados de acordo com a necessidade do projetista.

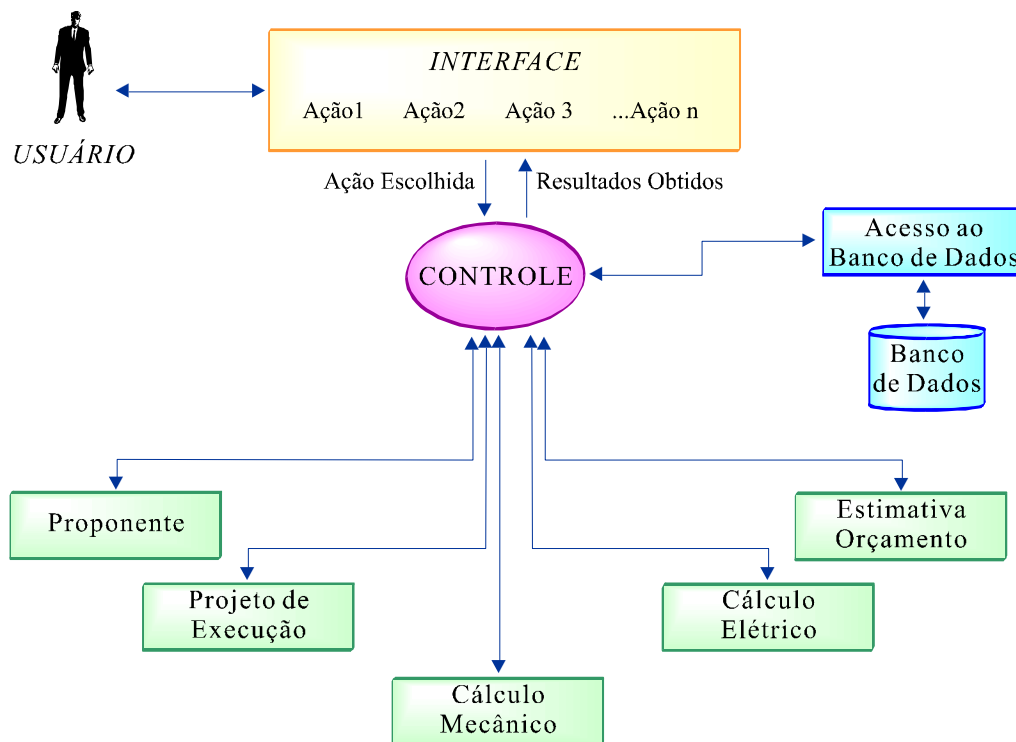


Figura 3.8 - Diagrama geral de relacionamento entre os módulos

Com a inclusão desta possibilidade de utilização do sistema, o projetista passa a dispor de ferramentas de auxílio à tomada de decisões na elaboração de projetos, e também de um ambiente fácil de utilizar e flexível, o qual se adapta a suas necessidades práticas.

Este trabalho apresentará nos próximos capítulos os detalhes do módulo Projeto de Execução e sua interação com um primeiro protótipo baseado nesta proposta conceitual de SAD para projetos e implementado por um grupo de pesquisa do qual a autora faz parte. Não é o objetivo deste trabalho discorrer sobre o desenvolvimento de todos os módulos do SAD, os quais são detalhados em Cavelucci et al. (2004a, 2004b, 2004c, 2004d).

Capítulo 4 - Projeto de Execução da Rede

4.1. Introdução

Para os diferentes tipos de projetos (ligação de consumidores, melhoramentos da rede de distribuição, núcleo habitacional e loteamento, iluminação pública e alimentadores e ramais) o projetista deve definir os elementos físicos da rede, baseando-se nas normas técnicas existentes e em sua experiência.

O projetista deve determinar a altura e dimensionamento dos postes, estruturas primárias e secundárias, amarrações, fixações, ligação de consumidores, localização de pára-raios, entre outros elementos. A definição deste conjunto de elementos é chamada de projeto de execução da rede. A partir do projeto de execução são definidos o material e mão-de-obra necessária à instalação física da rede.

4.2. Elementos do projeto de execução

De acordo com o tipo de projeto, o projetista deve determinar os elementos que irão compor a rede física.

4.2.1. Poste

A definição do tipo de poste a ser utilizado deve levar em consideração se o poste participa de um cruzamento aéreo, presença de rede primária, transformador, chave, etc...

Os postes de concreto podem ser categorizados de acordo com sua altura (exemplo: 11 metros). Os tipos de postes utilizados são: 9/200; 9/400; 9/600; 11/200; 11/400; 11/600; 11/1000; 12/400; 12/600; 12/1000.

O poste deve ser dimensionado de forma a suportar todos os esforços solicitantes provenientes dos diversos elementos nele instalados. A Figura 4.1 mostra um poste de 9 metros.

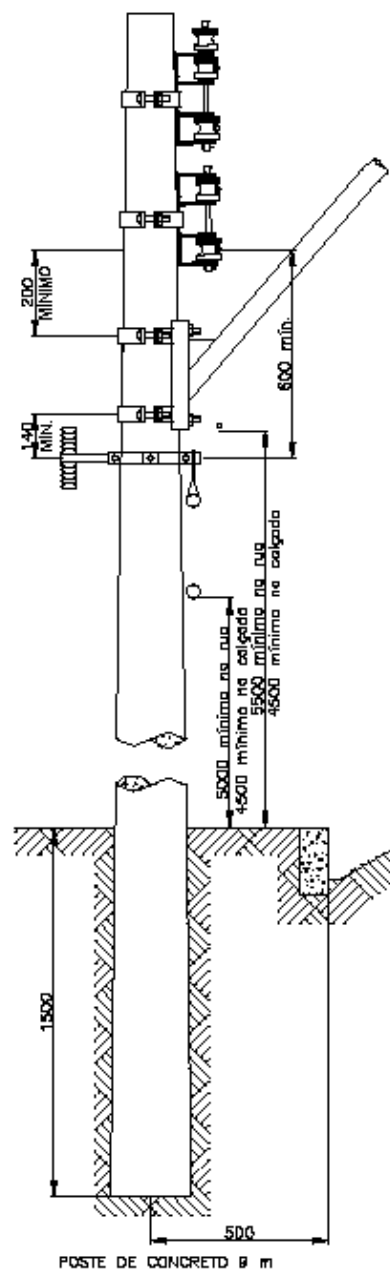


Figura 4.1 – Poste de concreto de 9 metros

4.2.2. Estrutura primária: definição e fixação

As estruturas primárias são colocadas nos postes por onde passa a rede de distribuição primária (13,8 kV). A rede de distribuição primária pode ser do tipo nua ou compacta. Para correta determinação das estruturas deve-se levar em consideração os segmentos de rede que passam pelo poste. Pode haver somente segmentos de rede nua, somente segmentos de rede

compacta, um segmento de rede nua e outro de compacta (transição) e dois segmentos de um tipo e o terceiro de outro tipo (derivação – nua derivando de compacta ou compacta derivando de nua).

Outro fator a ser considerado é se o poste está em situação fim-de-linha (o traçado da rede termina no poste), passante (a rede continua após o poste), derivação (um outro traçado é derivado a partir do poste) e mudança de bitola (existe uma mudança dos cabos condutores a partir do poste). O ângulo formado entre os segmentos e o tipo de cabo dos segmentos também deve ser avaliado.

Além disso, para redes do tipo nua, deve-se considerar o afastamento do poste em relação à fachada das casas – tipos normal, meio-beco.

Na Figura 4.2 são mostradas algumas estruturas de rede nua.

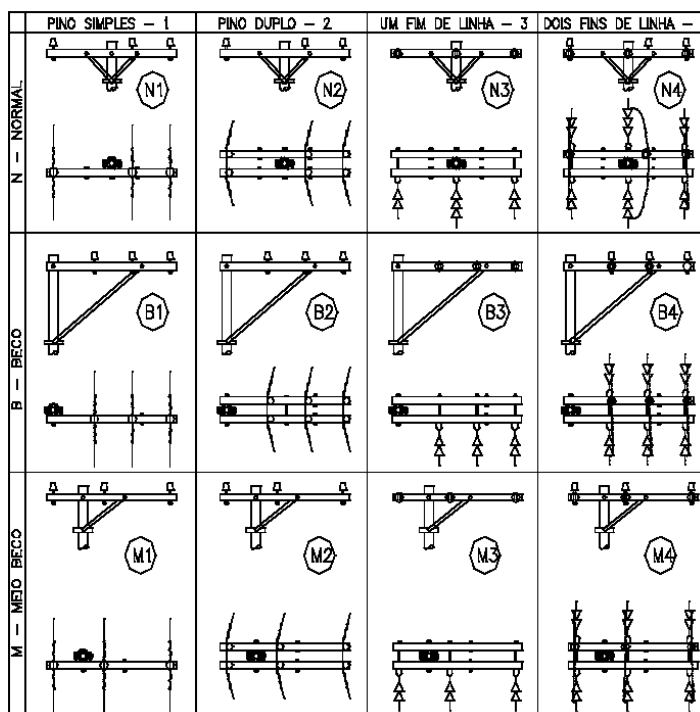


Figura 4.2 – Estruturas primárias de rede nua

Na tabela abaixo são apresentados exemplos de estruturas primárias e de modo geral, as situações em que são utilizadas.

Estrutura primária	Afastamento	Situação de utilização
CE3-1		rede compacta – fim de linha, derivação nua-compacta
CE1-1		rede compacta – passante, derivação compacta-nua
CE2-1		rede compacta – passante, derivação compacta-nua
CE3CE3-1		rede compacta – passante, derivação compacta-nua
CESHN3		rede compacta – derivação compacta-compacta
CE4-1		rede compacta – passante, rede compacta – mudança de bitola, derivação nua-compacta, derivação compacta-nua
N1	Normal	rede nua – passante, rede nua – derivação nua-nua
N2	Normal	rede nua – passante, rede nua – fim de linha, rede nua – derivação nua-nua, derivação nua-compacta, derivação compacta-nua
N2-N2	Normal	rede nua – passante, rede nua – derivação nua-nua, derivação nua-compacta
N3-N3	Normal	rede nua – passante, rede nua – derivação nua-nua, derivação nua-compacta
N4	Normal	rede nua – passante, rede nua – mudança de bitola, rede nua – derivação nua-nua
N2-3	Normal	rede nua – mudança de bitola, rede nua – derivação nua-nua
N3	Normal	rede nua – fim de linha, rede nua – derivação nua-nua, derivação nua-compacta, derivação compacta-nua
N3DER	Normal	rede nua – derivação a partir de uma rede existente
CE3N1-1	Normal	derivação nua-compacta
CE3N2-1	Normal	derivação nua-compacta
CE3N4-1	Normal	derivação nua-compacta
B1	Beco	rede nua – passante, rede nua – derivação nua-nua
B2	Beco	rede nua – passante, rede nua – fim de linha, rede nua – derivação nua-nua, derivação nua-compacta, derivação compacta-nua

Estrutura primária	Afastamento	Situação de utilização
B2-B2	Beco	rede nua – passante, rede nua – derivação nua-nua, derivação nua-compacta
B3-B3	Beco	rede nua – passante, rede nua – derivação nua-nua, derivação nua-compacta
B4	Beco	rede nua – passante, rede nua – mudança de bitola, rede nua – derivação nua-nua
B2-3	Beco	rede nua – mudança de bitola, rede nua – derivação nua-nua
B3	Beco	rede nua – fim de linha, rede nua – derivação nua-nua, derivação nua-compacta, derivação compacta-nua
CE3B1-1	Beco	derivação nua-compacta
CE3B2-1	Beco	derivação nua-compacta
CE3B4-1	Beco	derivação nua-compacta
CE3B3-1	Beco	transição
M1	Meio-beco	rede nua – passante, rede nua – derivação nua-nua
M2	Meio-beco	rede nua – passante, rede nua – fim de linha, rede nua – derivação nua-nua, derivação nua-compacta, derivação compacta-nua
M2-M2	Meio-beco	rede nua – passante, rede nua – derivação nua-nua, derivação nua-compacta
M3-M3	Meio-beco	rede nua – passante, rede nua – derivação nua-nua, derivação nua-compacta
M4	Meio-beco	rede nua – passante, rede nua – mudança de bitola, rede nua – derivação nua-nua
M2-3	Meio-beco	rede nua – mudança de bitola, rede nua – derivação nua-nua
M3	Meio-beco	rede nua – fim de linha, rede nua – derivação nua-nua, derivação nua-compacta, derivação compacta-nua
CE3M1-1	Meio-beco	derivação nua-compacta
CE3M2-1	Meio-beco	derivação nua-compacta

Estrutura primária	Afastamento	Situação de utilização
CE3M4-1	Meio-beco	derivação nua-compacta
CE3M3-1	Meio-beco	transição

Tabela 4.1 – Tipos de estruturas primárias

A fixação é definida considerando-se a estrutura primária e o tipo de poste.

4.2.3. Amarração primária

A amarração é definida considerando-se a estrutura primária e o condutor. Pode ser dos seguintes tipos:

- Laço: preformado de topo (Figura 4.3); lateral preformado (Figura 4.4); lateral duplo preformado (Figura 4.5);

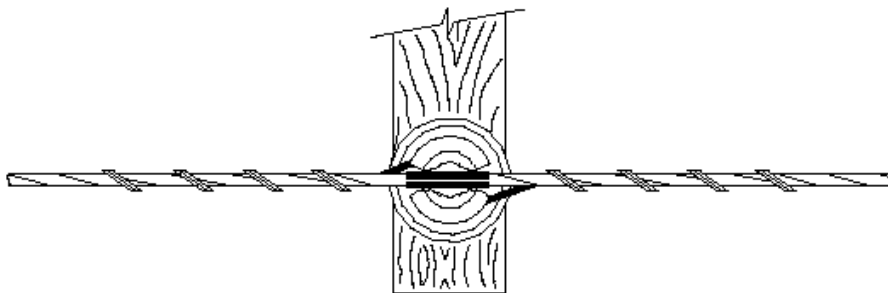


Figura 4.3 – Amarração laço preformado de topo

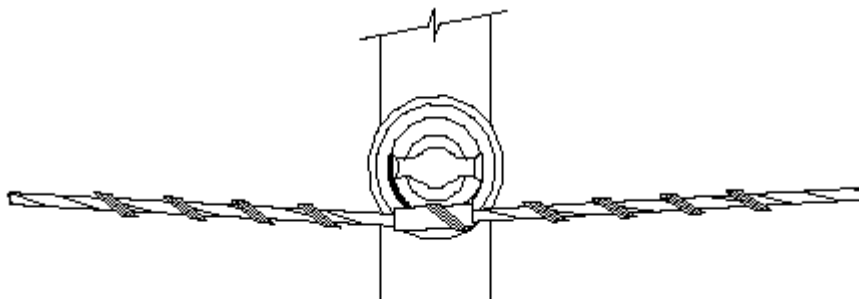


Figura 4.4 – Amarração laço lateral preformado

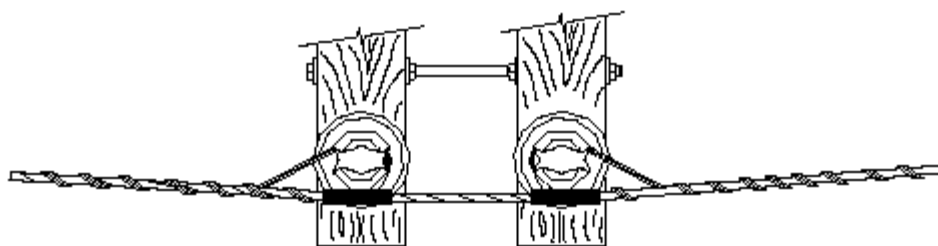


Figura 4.5 – Amarração laço lateral duplo preformado

- Encabeçamento normal: com grampo tensor (Figura 4.6); com alça preformada (Figura 4.7); com alça preformada olhal (Figura 4.8);

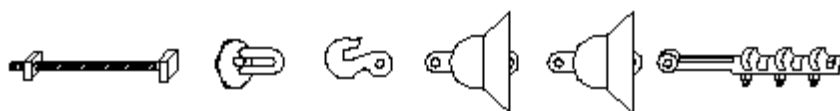


Figura 4.6 – Encabeçamento normal grampo tensor

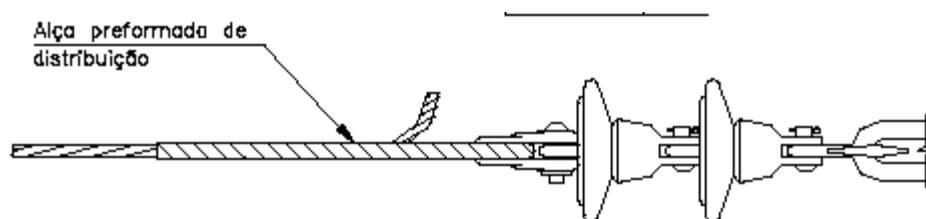


Figura 4.7 – Encabeçamento normal alça preformada



Figura 4.8 – Encabeçamento normal alça preformada olhal

- Encabeçamento invertido com isolador disco: com grampo tensor (Figura 4.9); com alça preformada (Figura 4.10); com alça preformada olhal (Figura 4.11).



Figura 4.9 – Encabeçamento invertido com isolador disco grampo tensor

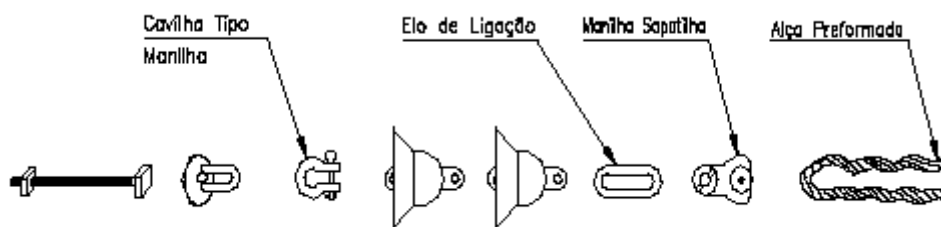


Figura 4.10 – Encabeçamento invertido com isolador disco alça preformada

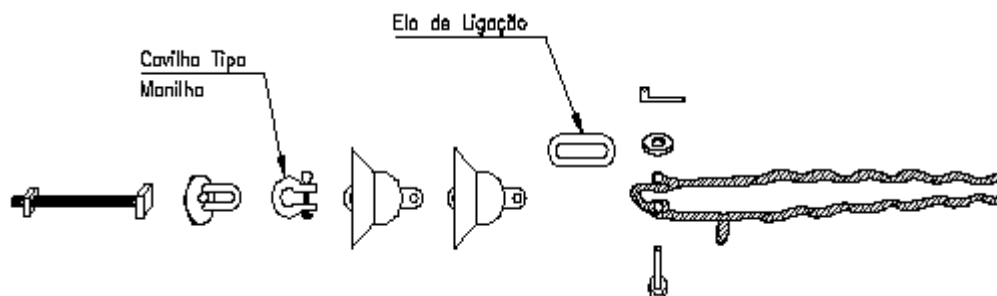


Figura 4.11 – Encabeçamento invertido com isolador disco alça preformada olhal

4.2.4. Estrutura secundária: definição e fixação

As estruturas secundárias são colocadas nos postes por onde passa a rede de distribuição secundária (geralmente 220 ou 127V).

A rede de distribuição secundária pode ser do tipo nua ou multiplexada. Para correta determinação das estruturas devem-se levar em consideração os segmentos de rede que passam pelo poste. Podem-se ter somente segmentos de rede nua, somente segmentos de rede multiplexada, um segmento de rede nua e outro de multiplexada (transição).

Outro fator a ser considerado é se o poste está em situação fim-de-linha (o traçado da rede termina no poste), passante (a rede continua após o poste), derivação (um outro traçado é derivado a partir do poste) e fim de circuito (o poste é a fronteira entre dois circuitos elétricos). O ângulo formado entre os segmentos e a existência ou não de ramal de ligação também devem ser avaliados. Ramais de ligação são os condutores e acessórios compreendidos entre o ponto de conexão da rede aérea urbana e o ponto de entrega.

No caso de redes nuas, outra informação importante é o número de condutores incluindo o neutro.

Na Figura 4.12 estão exemplos de estruturas secundárias.

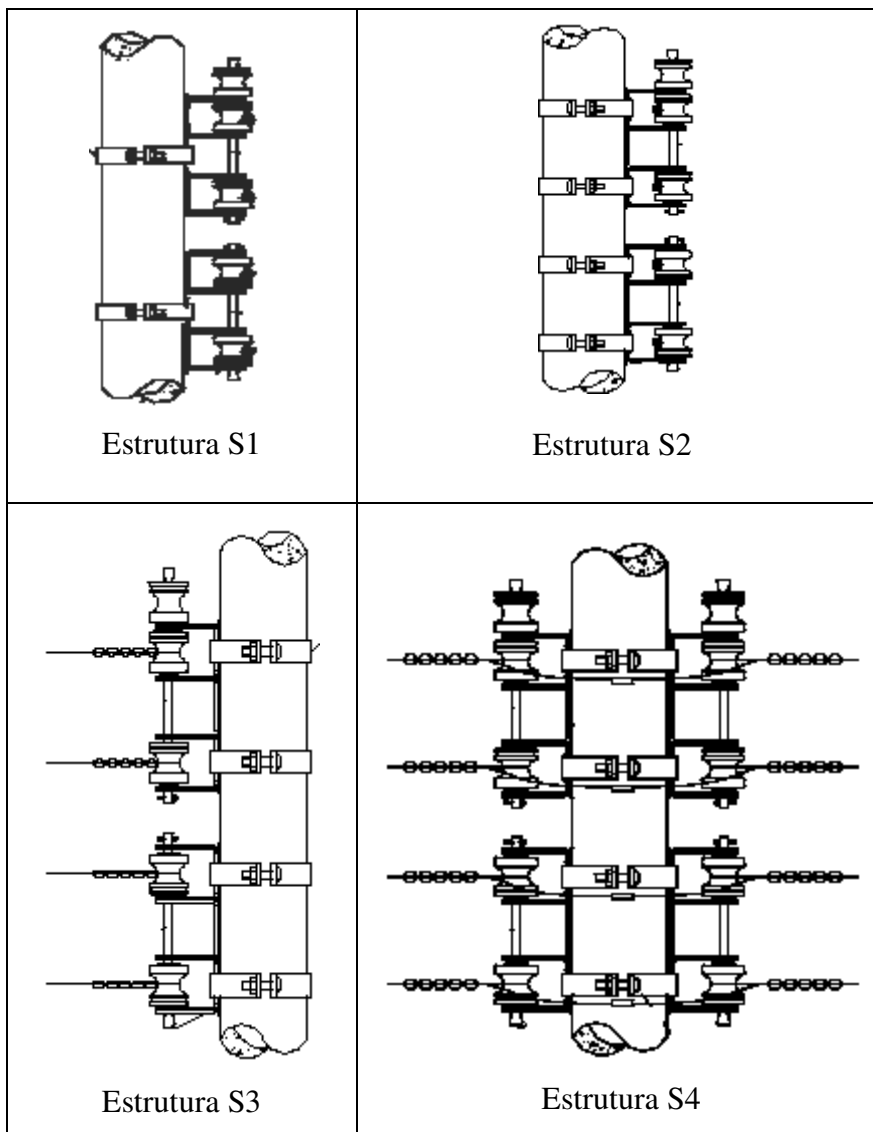


Figura 4.12 – Exemplos de estruturas secundárias

Na Tabela 4.2 estão algumas estruturas secundárias e suas utilizações.

Estrutura secundária	Situação de utilização
S1	rede multiplexada – fim de linha; rede multiplexada – derivação; rede multiplexada – passante; rede multiplexada – fim de circuito; transição
S2	rede multiplexada – fim de linha; rede multiplexada – passante; rede multiplexada – fim de circuito; transição; rede nua – fim de linha
S21D	rede multiplexada – derivação; rede multiplexada – passante
S3	transição; rede nua – fim de linha; rede nua – fim de linha
S22	transição; rede nua – fim de linha
S32	rede nua – fim de linha
S31D	rede nua – derivação com três cabos iguais que pertencem ao mesmo circuito e são da mesma família
S321D	rede nua – derivação com três cabos nus, sendo dois iguais e um diferente

Tabela 4.2 – Tipos de estruturas primárias

A fixação é definida considerando-se a estrutura secundária e o tipo de poste.

4.2.5. Amarração secundária

Para determinar a amarração secundária devem-se considerar o condutor e a situação do poste (passante fim de linha, derivação, fim de circuito).

As amarrações podem ser feitas com alça preformada (Figura 4.13) ou com laço preformado de roldana (Figura 4.14).

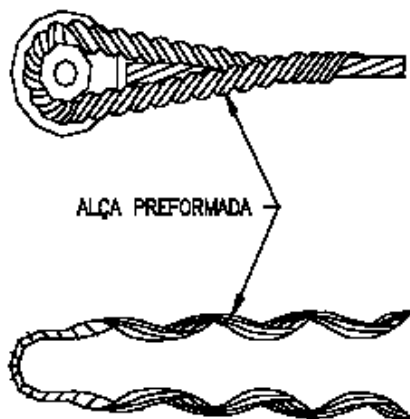


Figura 4.13 – Amarração com alça preformada

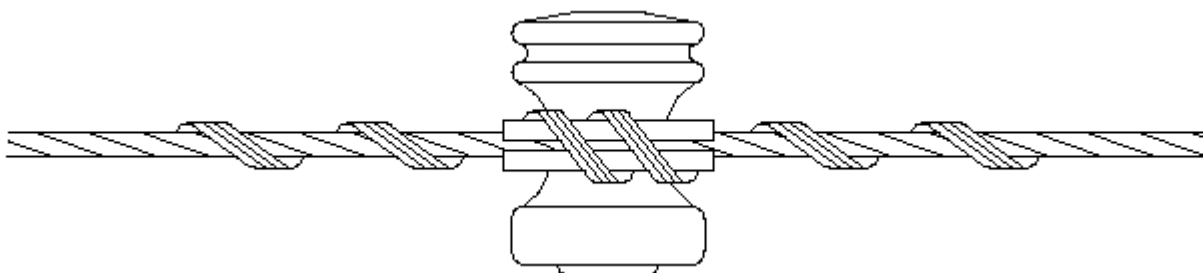


Figura 4.14 – Amarração com laço preformado de roldana

4.2.6. Transformador

Os transformadores de distribuição têm a finalidade de abaixar a tensão para os níveis usuais dos consumidores (no Brasil, geralmente 220 ou 127 V). No projeto de execução deve-se determinar a estrutura, a fixação e ligação à rede secundária do transformador previamente determinado no projeto elétrico.

Na Figura 4.15 é apresentado um desenho esquemático do transformador.

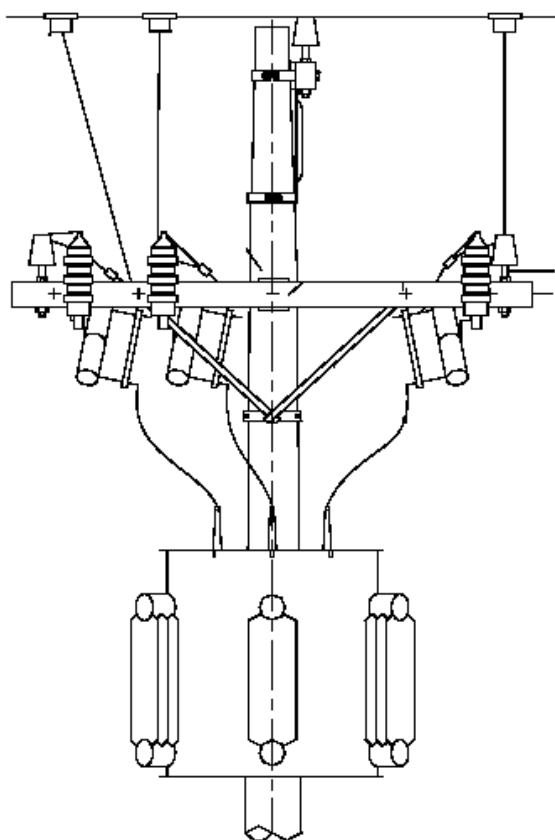


Figura 4.15 – Desenho esquemático de transformador

A definição da estrutura do transformador considera o tipo de rede primária (compacta ou nua) e a situação do poste (passagem, fim de linha, etc.). Para definir a fixação do transformador devem-se considerar o tipo de rede e o tipo de poste.

4.2.7. Outros elementos

Além dos elementos acima mencionados deve-se definir *flying-taps* primários e secundários, instalações de chaves a óleo, chaves fusíveis e chaves faca, ligação de pára-raios, dentre outros.

4.3. Projeto de execução

A elaboração do projeto de execução demanda bastante conhecimento das normas técnicas e experiência por parte do projetista. O número elevado de elementos que constituem a rede e as diversas situações de projeto faz com que esta tarefa, aparentemente simples, seja complexa e demorada.

Para determinar os elementos construtivos da rede, o projetista deve considerar diversos fatores, tais como: projeto elétrico da rede (circuitos, traçado de rede primária, localização dos transformadores), tipo de condutores utilizados, ângulo entre os segmentos de rede e tipo de afastamento do poste em relação à rua. Esta tarefa, apesar de tediosa, necessita de muita concentração e é repetida diversas vezes (escolha de todos os elementos para todos os postes do projeto), podendo ocasionar diversos erros no projeto de execução.

Estas características motivaram o desenvolvimento de uma ferramenta baseada na técnica de sistemas especialistas (SE) para auxiliar o projetista na elaboração dos projetos de execução. A ferramenta foi projetada como um módulo do sistema de apoio à decisão descrito no Capítulo 3, o que proporciona maior flexibilidade em sua utilização. Acredita-se que aplicar um SE nesta tarefa possa contribuir para o aumento da padronização dos projetos, diminuição dos erros e redução do tempo gasto nesta atividade.

O Capítulo 5 apresenta conceitos teóricos de um sistema especialista e o Capítulo 6 descreve as etapas do desenvolvimento do SE do módulo Projeto de Execução e integração deste módulo ao protótipo do SAD de projetos.

Capítulo 5 - Sistemas Especialistas

5.1. Introdução

Sistemas Especialistas (SE) pertencem ao conjunto de técnicas da área de Inteligência Artificial (IA) utilizadas na resolução de problemas. Na Tabela 5.1 são mostradas diversas definições de SE encontradas na literatura.

Autores	Definição de SE
Barr, Cohen e Feigenbaum (1989)	“Sistemas inteligentes que utilizam conhecimento e procedimentos de inferência para resolver problemas que são difíceis o suficiente para requerer uma significativa experiência humana para sua solução”.
Harmon (1985)	“Programas possuidores de conhecimento intensivo, usam regras ou heurísticas para focalizar os aspectos chaves de problemas particulares e manipular descrições simbólicas para raciocinar sobre este conhecimento”.
Kandel (1986)	“Ferramenta que tem a capacidade de entender o conhecimento sobre um problema específico e usar este conhecimento inteligentemente para sugerir alternativas de ação”.
Liebowitz (1988)	“SEs são programas de computador que emulam o comportamento de especialistas humanos dentro de um domínio de conhecimento específico”.
Durkin (1994)	“Um programa de computador projetado para modelar a habilidade de resolver problemas de um especialista humano”.

Tabela 5.1 – Definições de SE

Destas definições pode-se inferir que as principais características dos SE são: resolver problemas considerando a experiência de especialistas humanos e possuir conhecimento específico sobre campos restritos do conhecimento.

Um SE deve ser capaz de propor uma decisão, apoiado em conhecimento justificado, a partir de um conjunto de informações, do mesmo modo que um especialista de determinada área do conhecimento humano. Para decidir sobre um determinado assunto, um especialista analisa os fatos fornecidos como informação de entrada e formula hipóteses (memória de curto prazo), utilizando conhecimento prévio armazenado no decorrer dos anos, durante seu período de formação e também no exercício da profissão (memória de longo prazo). A experiência do especialista humano é uma combinação do entendimento teórico do problema, bom senso e uma coleção de regras heurísticas que se mostraram eficientes na prática. Durante o processo de raciocínio, o especialista compara os fatos que encontra às informações contidas em seu conhecimento prévio e atribui a estes fatos determinado grau de importância, como ilustrado na Figura 5.1.

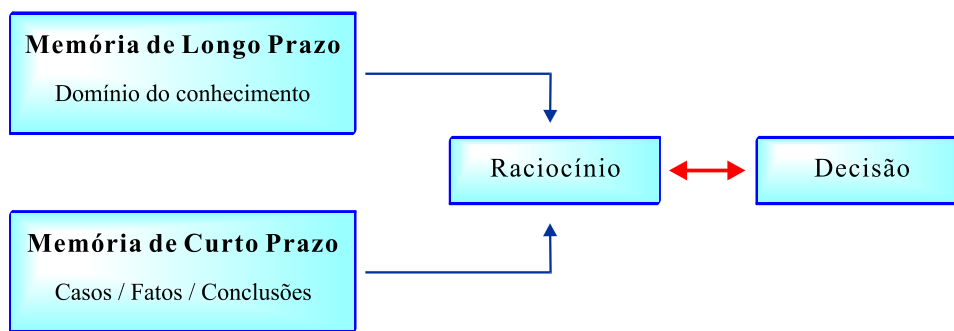


Figura 5.1 - Processo de raciocínio

Neste processo, novas hipóteses são formuladas, o que leva à inferência de outros fatos, que, por sua vez, também influenciarão no processo de raciocínio. Este ciclo ocorre até que o especialista chegue a uma decisão ou que conclua que não possui dados suficientes para tomar uma decisão. Um especialista pode inclusive tomar uma decisão errada, motivada pela sua análise dos fatos encontrados e o conhecimento prévio adquirido.

O processo de construção de um SE é geralmente chamado de Engenharia do Conhecimento e envolve a interação entre o construtor do SE, denominado engenheiro do conhecimento, e um ou mais especialistas do domínio a ser modelado. A tarefa do engenheiro de conhecimento é tentar captar o conhecimento do especialista (na forma de procedimentos, estratégias e regras práticas) e representar tal conhecimento de forma a manipulá-lo através de um sistema computacional, como mostrado na Figura 5.2.

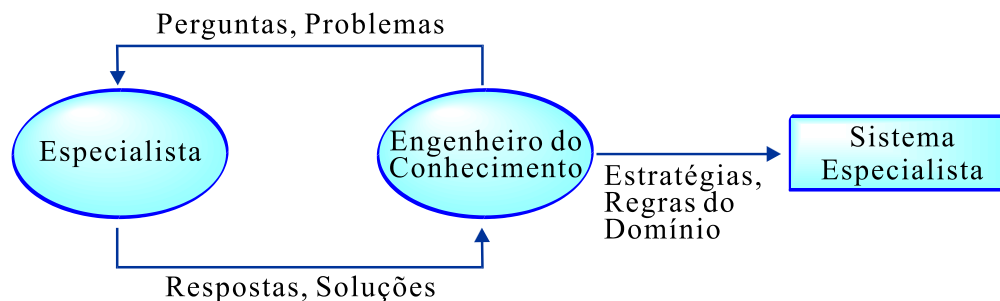


Figura 5.2 – Papel do engenheiro do conhecimento (Fonte: Waterman, 1986)

Nas próximas seções deste capítulo serão apresentados: um breve histórico sobre sistemas especialistas (Seção 5.2); as vantagens e desvantagens da utilização de SEs (Seção 5.3); uma categorização de tipos de sistemas especialista (Seção 5.4); uma arquitetura geral (Seção 5.5); as etapas de desenvolvimento dos SEs (Seção 5.6); sistemas especialistas baseados em regras (Seção 5.7), em modelos e em casos (5.8).

5.2. Breve Histórico

Na década de 50 começaram a ser abordados problemas de lógica e provas de teoremas. Foram desenvolvidos programas para solucionar problemas de lógica elementar, programas de jogos de xadrez e programas de resolução automática de teoremas.

Um dos marcos da década de 60 foi o programa Eliza, o qual simulava o diálogo de um psiquiatra com seu paciente utilizando um mecanismo de casamento de padrões.

Pode-se dizer que o projeto DENDRAL (1965-83) resultou em um dos mais antigos SEs. Ele foi desenvolvido na Universidade de Stanford no fim da década de 60 a pedido da NASA (Buchanan e Feigenbaum, 1978). Seu objetivo foi explorar o mecanismo e formulação do conhecimento específico em química orgânica. Após mais de uma década, o DENDRAL tornou-se uma ferramenta para análise da estrutura molecular, usado no meio acadêmico e em laboratórios de pesquisa nas indústrias. Usando o paradigma de busca planeja-gera-testa, dados obtidos de um espectrômetro de massa e de outras fontes, o DENDRAL propõe possíveis estruturas moleculares que são aceitáveis para compostos químicos novos ou desconhecidos (Stanford Medical Informatics, 2004). Durkin (1996) afirma que este projeto foi o início do desenvolvimento dos Sistemas Especialistas.

Enquanto o DENDRAL foi o marco para os sistemas baseados em conhecimento, o programa MYCIN estabelece a metodologia atual dos sistemas especialistas (Buchanan e Shortliffe, 1984). Desenvolvido entre 1972 a 1980 na Universidade de Stanford, o MYCIN é um programa interativo para o diagnóstico e tratamento de infecções bacteriológicas do sangue, podendo explicar o raciocínio feito na consulta. Sua principal característica é a separação do conhecimento armazenado do processo de inferência.

Seguiram vários outros SEs incluindo o PROSPECTOR para determinar a localização e tipo prováveis de depósitos de minérios baseados em informações geológicas (Hayes-Roth, Waterman e Lenat, 1983), CADUCEUS (meados da década de 70) para diagnósticos na área de medicina interna (Hayes-Roth, Waterman e Lenat, 1983), Dipmeter Advisor para interpretar os resultados dos registros sobre a perfuração de petróleo (Barr, Cohen e Feigenbaum, 1989) e XCON para configurar computadores VAX, desenvolvido em 1981 pela Digital Equipment Corporation (Forsyth, 1989).

Desde a criação destes sistemas pioneiros, a técnica de Sistemas Especialistas tem sido aplicada em diversas áreas, tais como: medicina, engenharia, química, agricultura e física.

5.3. Vantagens e Desvantagens dos Sistemas Especialistas

Dentre as vantagens dos sistemas especialistas, pode-se destacar:

- Podem ser utilizados a qualquer momento, pois não ficam cansados como os especialistas humanos ao enfrentar longas jornadas de trabalho diário;
- Apresentam maior flexibilidade no uso do conhecimento quando comparados a programas convencionais desenvolvidos para a mesma finalidade;
- Proporcionam permanência do conhecimento, uma vez que não esquecem;
- Podem lidar com incerteza: capacidade de lidar com conhecimento incompleto ou que apresente imprecisão;
- Possuem como base a experiência de pelo menos um especialista que se dispôs a cooperar na construção de uma base de conhecimento;
- Empregam heurísticas na resolução de problemas: empregam regras práticas com base na experiência cognitiva e intuição.
- Podem integrar conhecimento proveniente de várias fontes;

- Formalizam o conhecimento do especialista;
- Automatizam tarefas rotineiras e que podem desperdiçar muito tempo do especialista;
- Capacidade de reprodução do conhecimento: muitas cópias de um SE podem ser feitas;
- Consistência: um SE sempre terá o mesmo parecer, não sendo afetado por fatores externos;
- Imparcialidade: os SEs não são afetados por fatores emocionais;
- Podem ser documentados;
- Baixo custo operacional.

As principais desvantagens são:

- Possibilidade de inferências erradas;
- Não se adaptam automaticamente às mudanças, necessitando sofrer alterações em sua base de conhecimento, o que na maioria das vezes não é uma tarefa simples e rápida, o que ocasiona dificuldade de manutenção;
- Não aprendem com a experiência;
- São incapazes de eliminar conhecimentos redundantes e contraditórios;
- Podem elevar os custos de desenvolvimento, pois se exige bastante esforço na concepção da base de conhecimento;
- A tarefa de aquisição de conhecimento é uma tarefa difícil, em alguns casos impossibilitando o desenvolvimento do sistema;
- Não possuem capacidade de responder de forma criativa a situações não usuais;
- Não conseguem lidar com o raciocínio de senso comum.

5.4. Tipos de Sistemas Especialistas

Turban (1992) classifica as aplicações dos SEs de acordo com as características do seu funcionamento nas seguintes categorias: Interpretação; Diagnóstico; Monitoramento, Predição, Planejamento, Projeto, Depuração, Reparo, Instrução e Controle.

Um sistema de interpretação infere descrições de situações a partir da observação de fatos, analisando os dados em busca de suas relações e significados. Desprezam as interpretações que não tem consistência e tratam de dados que não são corretos e que não existem. Essa categoria

inclui espectroscopia de massa, análise de imagens para sensoriamento remoto, elucidação de estruturas químicas, interpretação de sinais e análise de circuitos.

Sistemas de diagnóstico podem usar tabelas para associar o comportamento ao diagnóstico ou combinar conhecimento do projeto do sistema às falhas potenciais. Estes sistemas detectam falhas advindas da interpretação dos dados e falhas do próprio diagnóstico. Possuem um sistema de interpretação de dados embutido. Nesta categoria podem-se incluir os sistemas para diagnóstico médico, eletrônico, mecânico e de software.

Os sistemas de monitoramento interpretam as observações de sinais sobre o comportamento monitorado, comparando tal comportamento observado às características que considera cruciais a obtenção dos resultados planejados, isto é, compara o estado atual do sistema a limites preestabelecidos e sinaliza quando forem requeridas intervenções. Pode-se aplicar essa classe de sistema em vários tipos de monitoramento. Por exemplo, no monitoramento de plantas de geração de energia nuclear, tráfego aéreo, doenças e regulamentação.

Sistemas de predição tipicamente empregam um modelo dinâmico paramétrico com os valores dos parâmetros fixados em uma dada situação. Baseia sua solução na análise de comportamento de dados referentes a situações no passado, faz uso de raciocínio hipotético e verifica a tendência de acordo com a variação destes dados de entrada. Fazem parte desta categoria sistemas para previsão meteorológica, previsão demográfica, previsão de tráfego e estimativa sobre colheita.

Os sistemas de planejamento propõem um programa de ações a serem tomadas a fim de se atingir um objetivo específico, estabelecendo etapas e subetapas, bem como prioridades para possíveis etapas conflitantes. São geralmente utilizados em problemas de solução complexa e podem exigir análises mais profundas do especialista que trabalha com o sistema. Incluem planejamento de operação de robôs, rotas, comunicação, experimentos e manobras na rede de distribuição de energia elétrica.

Sistemas para projetos auxiliam no desenvolvimento da especificação de objetos baseando-se num conjunto de restrições impostas pelas normas técnicas e pelas características de operação. Estes objetos também podem ser abstratos, como programas de computadores. Exemplos dessa categoria são os sistemas para elaborar o layout de circuito, projeto de construção civil e projeto de redes de distribuição de energia elétrica.

Os sistemas de depuração possuem mecanismos para fornecer soluções para o mau funcionamento provocado por alterações e distorções nos dados de entrada. Provêm, de maneira automática, mecanismos para validar as várias etapas necessárias à execução de determinado processo. Estes sistemas, em muitos casos, incorporam sistemas de diagnóstico para detectar a causa do problema. Estão presentes nesta categoria sistemas para seleção do tipo de manutenção necessária para corrigir falhas nos cabos telefônicos e sistemas para escolha do procedimento de reparo em locomotivas.

Sistema de reparo desenvolve e executa planos para administrar a correção de algum problema diagnosticado, incorporando as capacidades de depurar, planejar e executar. Sistemas de auxílio por computador ocorrem no domínio automobilístico, transporte aéreo e manutenção de computadores.

Os sistemas de treinamento têm por objetivo ensinar estudantes para que sejam eliminadas as deficiências em seu conhecimento. Iniciam com a construção de uma descrição hipotética do conhecimento do estudante para interpretar seu comportamento. Posteriormente, diagnostica as deficiências no conhecimento do estudante e identifica a forma de correção apropriada, planejando um tutorial para guiar interativamente o estudante na obtenção do conhecimento. São exemplos desta categoria sistemas para ensino de linguagens de programação e treinamento de operadores de processos.

Um SE para controle gerencia o comportamento geral de um sistema adaptando-o a estados estáveis. O sistema deve repetitivamente interpretar a situação atual, prever o futuro, diagnosticar antecipadamente as causas dos problemas, formular um plano de reparação e monitorar sua execução. Problemas tratados por controle incluem controle de tráfego aéreo, gerenciamento de negócios, gerenciamento de manufatura e controle de tratamento pós-cirúrgico em pacientes internados em unidades de terapia intensiva.

O objetivo desta classificação não é esgotar as possíveis aplicações de SEs, mas sim orientar o processo de construção de programas computacionais, assinalando as características principais de cada uma das categorias.

Projetos de redes de distribuição de energia elétrica se enquadram na categoria de SE para projetos e devem atender as normas técnicas estabelecidas pelos órgãos reguladores.

5.5. Arquitetura de Sistemas Especialistas

Existem diversos exemplos de arquiteturas de sistemas especialistas na literatura. Um modelo geral de arquitetura pode ser visto na Figura 5.3.

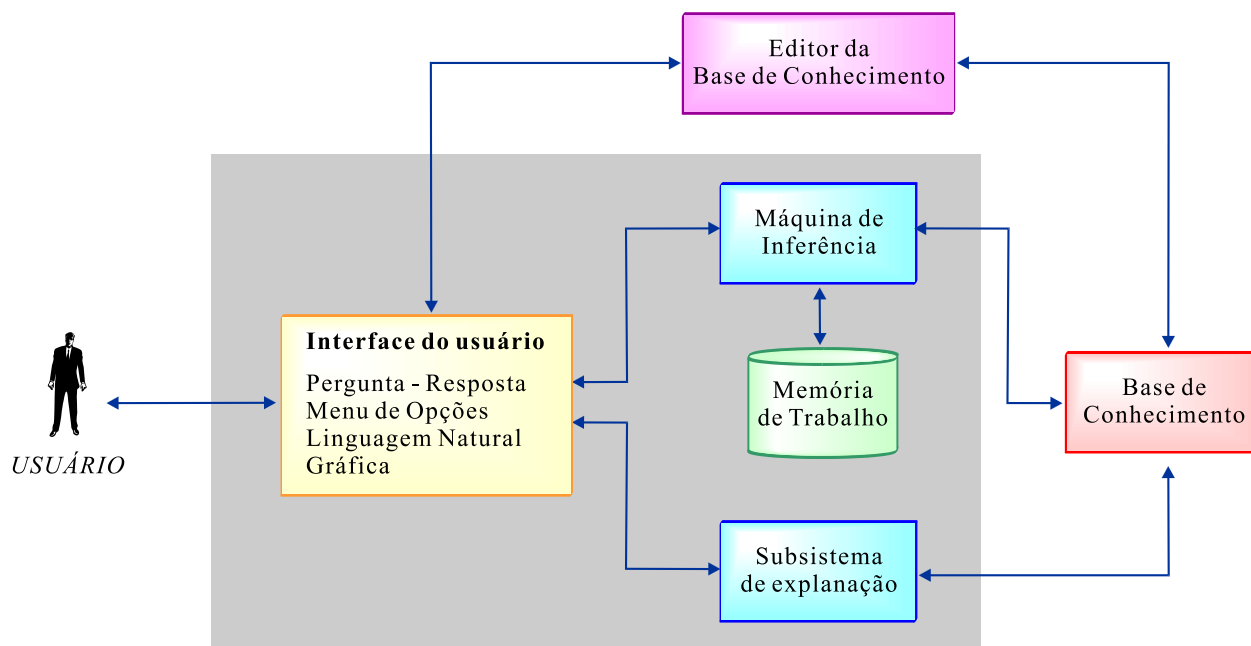


Figura 5.3 – Modelo geral de arquitetura de SE

A base de conhecimento representa a memória de longo prazo, a memória de trabalho representa a memória de curto prazo, e o motor de inferência representa o processador cognitivo (raciocínio).

A interação com o SE é feita por meio da Interface Homem-Máquina (IHM), cujo objetivo é simplificar a comunicação e a utilização do sistema. As técnicas mais empregadas na interface do usuário são perguntas-resposta (na forma texto), menu de opções, linguagem natural, ou ainda, interface gráfica.

A base de conhecimento é um agrupamento de conhecimentos do domínio da aplicação, representado mediante uma técnica adequada ao sistema em questão, como por exemplo: regras de produção, quadros, redes semânticas, entre outras (descritas na Seção 5.6.2). A base de conhecimento armazena informações factuais e inclui os relacionamentos entre os fatos. A aquisição do conhecimento que irá compor a base de conhecimento representa a etapa mais complexa do desenvolvimento do sistema especialista.

A máquina de inferência aplica o conhecimento na solução do problema. Ela é essencialmente um interpretador da base de conhecimento, que combina os fatos contidos na memória de trabalho com o domínio do conhecimento (contido na base de conhecimento), gerando novos fatos a partir dos fatos existentes. A máquina de inferência também se responsabiliza pela sequência de ações que deverão ser encadeadas ou pela sequência de regras aplicadas.

Nos sistemas de produção, a máquina de inferência executa o ciclo de controle reconhecer-agir, separadamente das regras de produção. Luger (2002) observa que a separação entre a máquina de inferência e a base de conhecimento torna-se importante pelas seguintes razões:

- A representação das regras é mais natural;
- O desenvolvimento do SE se concentra na organização da base de conhecimento e não na implementação computacional;
- Pode-se alterar parte da base de conhecimento sem afetar o restante do sistema;
- A interface com o usuário e o controle de inferência podem ser utilizados em outros SE.

O controle da máquina de inferência pode ser dirigido por metas em encadeamento para trás (*backward chaining*) ou em encadeamento para frente (*forward chaining*). No encadeamento para trás as regras são executadas na direção conclusão-premissa, através do uso de hipóteses. Ou seja, trata-se de um processo de provar hipóteses. É usado quando um conjunto de fatos pode levar a um grande número de conclusões, quando o número de maneiras de se chegar à conclusão é pequeno ou quando não se têm todos os fatos disponíveis e se está interessado em se uma das muitas possíveis conclusões é verdadeira. No encadeamento para frente, as regras são executadas na direção premissa-conclusão. É usado quando uma hipótese pode derivar muitas questões, quando o número de conclusões que se pode atingir é pequeno, quando o número de maneiras de se chegar a uma conclusão é grande ou quando se têm todos os fatos disponíveis e quer-se concluir tudo o que é possível com eles (Russel e Norvig, 1995).

Um exemplo de máquina de inferência com encadeamento para trás é baseada nos conceitos usados no Sistema Especialista MYCIN (Buchanan e Shortliffe, 1984). Um exemplo de

máquina de inferência utilizando encadeamento para frente é a utilizada pelo sistema do tipo *shell* CLIPS (C Language Integrated Production System), apresentado na Seção 6.2.3.

A memória de trabalho contém as informações iniciais e os fatos de um problema que são descobertos durante uma consulta. Tais fatos podem ser informados pelo usuário do sistema ou fornecidos pela avaliação de uma das regras da base de conhecimento. A memória de trabalho é dinâmica, possibilitando a inserção ou alteração de um determinado fato durante a resolução de um mesmo problema.

O subsistema de explicação tem como objetivo justificar ao usuário o raciocínio utilizado na solução do problema. Justifica-se a conclusão para a pergunta do usuário *Como?* e explica-se a necessidade de um determinado dado de entrada quando a pergunta *Por que?* é feita pelo usuário.

A existência de um editor da base de conhecimento é opcional. Ele ajuda a localizar e remover ambigüidades existentes na base de conhecimento, na edição de novos conhecimentos e corrigir a sintaxe da forma do conhecimento.

5.6. Etapas do Desenvolvimento de Sistemas Especialistas

O processo de desenvolvimento de um sistema especialista pode ser dividido nas seguintes etapas: identificação do problema, aquisição do conhecimento, representação do conhecimento, implementação, verificação e validação.

5.6.1. Identificação do Problema

Nesta etapa, devem-se identificar as características do problema a ser tratado, se este pode ser resolvido utilizando-se a técnica de sistemas especialistas e quais as vantagens que a utilização de SE apresentam em relação à forma como o problema é resolvido no momento.

Liebowitz (1988) apresenta algumas características de um problema que pode tornar desejável a utilização de um SE:

- A tarefa é bem delimitada, o que evita explosão combinatória durante a tentativa de sua resolução;
- O enfoque principal da tarefa é processamento simbólico e não processamento numérico;

- O tempo de resolução da tarefa é alto;
- A tarefa é realizada com bastante frequência;
- Existe consenso sobre o resultado da tarefa;
- É possível encontrar um especialista disposto a participar no desenvolvimento do SE, que disponha o tempo necessário para colaborar e que seja articulado (tenha facilidade na apresentação de seu conhecimento) e possa ser entendido pelo engenheiro de conhecimento.

Se depois de realizada a avaliação, chegar-se à conclusão de que é viável a construção de um SE para resolução do problema, deve-se identificar os recursos envolvidos no desenvolvimento. É necessário escolher o especialista, identificar os livros, revistas, normas técnicas que podem ser utilizados, estimar o tempo para o desenvolvimento do SE, definir os recursos computacionais necessários (hardware e software) e avaliar os recursos financeiros disponíveis. Além disso, devem-se estabelecer os objetivos a serem alcançados.

5.6.2. Aquisição do Conhecimento

Esta etapa consiste em definir a base conceitual do sistema especialista e exigirá repetidas interações entre o engenheiro de conhecimento e o especialista, o que consome bastante tempo e se mostra bastante complexa. Trata-se de uma das etapas mais críticas do desenvolvimento de um sistema especialista.

Liebowitz (1988) afirma que o engenheiro de conhecimento deve se familiarizar com o domínio do problema e a tarefa específica antes de iniciar as sessões de aquisição de conhecimento com o especialista, através da leitura de livros, manuais, normas técnicas, artigos e outros documentos disponíveis, a fim de tirar dúvidas básicas e aumentar o conhecimento inicial sobre o problema a ser abordado.

A forma mais utilizada para extrair o conhecimento do especialista é a realização de entrevistas. O grande problema encontrado é a dificuldade que o especialista apresenta para descrever de forma clara e detalhada os passos seguidos durante a realização de determinada atividade (Waterman, 1986). Os especialistas, na maioria dos casos, resolvem os problemas intuitivamente, sem utilizar regras ou estratégias, mesmo que estas existam.

Além dos especialistas podem ser consultados livros, manuais, normas técnicas e quaisquer outros documentos que possam ser úteis ao entendimento do domínio da aplicação.

Ao final desta etapa devem ter sido definidos os conhecimentos disponíveis, as hipóteses que são consideradas no domínio do problema e o relacionamento e ordenação dos conhecimentos.

5.6.3. Representação do conhecimento

O conhecimento adquirido na etapa anterior deve ser representado de maneira formal e estruturada, a fim de ser utilizado na implementação do sistema especialista.

Diversas são as técnicas de representação de conhecimento. Dentre elas, temos: regras de produção, modelagem orientada a objetos, quadros (*frames*), triplas objeto-atributo-valor (OAV), redes semânticas, listas e árvores, apresentados a seguir.

A) Regras de produção

Neste tipo de representação, a base de conhecimento é concebida como um conjunto de regras.

Waterman (1986) afirma que as regras de produção são uma maneira formal de representar recomendações, diretrizes ou estratégias e que elas são apropriadas quando o domínio do conhecimento resulta de associações empíricas desenvolvidas ao longo do tempo através da experiência de especialistas na resolução de problemas.

As regras de produção consistem de duas partes: a primeira, chamada de antecedente, ou premissa ou condição e a segunda, chamada de conseqüente, ou conclusão, ou ação.

As regras de produção são afirmações do tipo:

IF esta condição (ou premissa ou antecedente) ocorre, THEN alguma ação (ou resultado, ou conclusão ou conseqüência) ocorre.

Os antecedentes (ou premissas ou condições) são formados por fatos presentes na base de conhecimento e os conseqüentes (ou conclusões ou condições) são inferidos quando os antecedentes são verdadeiros.

As regras podem possuir conectivos lógicos (AND, OR e NOT) ligando seus antecedentes.

Esta é a técnica mais utilizada no desenvolvimento de sistemas especialistas, devido a algumas características: apresentam um modo intuitivo de representação do conhecimento e são mais fáceis de implementar e de validar do que outras estruturas.

Um exemplo de regra para projetos de redes é apresentado abaixo:

SE “a rede secundária é proposta”

E “existem dois cabos secundários no poste”

E “os dois cabos secundários são iguais”

E “os dois cabos fazem parte do mesmo circuito de rede secundária”

ENTÃO “a situação da rede secundária no poste é passante”

B) Triplas OAV

Uma forma de representação de conhecimento simples, utilizada principalmente como apoio na fase de aquisição de conhecimento, é o uso de objetos, atributos e valores, conhecidos como triplas O-A-V (Buchanan e Shortliffe, 1984).

Os objetos podem ser físicos ou conceituais. Os atributos são as características dos objetos. Os valores são as medidas específicas dos atributos em uma dada situação.

O objeto ESTRUTURA PRIMÁRIA possui os atributos: Tipo de rede em que é utilizada, Tipo de situação em que é utilizada e Tipo de espaçamento em que é colocada. Para a estrutura primária N2-N2 os valores dos atributos são, respectivamente: Nua, Derivação e Normal.

C) Redes Semânticas

Uma rede semântica é composta de nós conectados por ligações denominadas arcos, sendo que os nós representam objetos, conceitos ou eventos e cada arco representa o relacionamento existente entre cada par de nós (Russel e Norvig, 1995).

Uma das mais importantes características das redes semânticas é que elas podem mostrar o conceito de herança (os nós herdam características de outros nós aos quais estão interligados). Algumas de suas vantagens são: flexibilidade, inteligibilidade, maleabilidade, simplicidade e herança. Alguns problemas encontrados no desenvolvimento das redes são: definir a herança,

encontrar uma semântica exata do nó e das suas ligações, fazer representações canônicas em domínios específicos, representar crenças, hipóteses e o fator tempo.

D) Quadros

Um quadro é uma estrutura de dados que inclui todo o conhecimento sobre um objeto particular, organizado de maneira muito parecida com uma rede semântica, sendo uma rede de nós e relações organizadas de forma hierárquica (Russel e Norvig, 1995).

Um quadro é formado de dois elementos básicos: *slots* e *facet*as. Um *slot* é um conjunto de atributos que descrevem o objeto representado pelo quadro. Seus valores podem ser numéricos, *strings*, booleanos (verdadeiro ou falso), etc. Cada *slot* possui uma ou mais *facet*as, que descrevem algum conhecimento ou procedimentos a cerca do atributo do *slot*.

O arranjo hierárquico dos quadros permite herança, processo no qual as características dos quadros-pai são herdadas pelo quadro-filho, a menos que estes valores sejam deliberadamente alterados no quadro-filho. Os quadros-pai contêm as definições dos atributos. Os quadros-filho contêm os valores atuais dos atributos.

Os quadros possuem a habilidade de determinar se ele próprio é aplicável em uma dada situação. Quando um quadro é selecionado para auxiliar no processo de entendimento da situação corrente (diálogo, cena, problema), este tenta unificar-se aos dados para descobrir se é ou não aplicável. Se não for, transfere o controle a um frame mais apropriado.

E) Lógica

A lógica é uma das primeiras tentativas de representação do raciocínio ou conhecimento humano (Russel e Norvig, 1995). A forma geral de qualquer processo lógico é ilustrada na Figura 5.4.



Figura 5.4 – Processo Lógico

Primeiramente, uma informação é dada ou observações são realizadas. Estas formam as entradas para o processo lógico e são chamadas premissas. As premissas são usadas pelo processo lógico para gerar as saídas que consistem em conclusões denominadas inferências. Com este processo, utilizam-se fatos que são conhecidos para verdadeiro para derivar novos fatos e verificar sua validade.

As duas formas básicas de lógica computacional são a lógica proposicional e o cálculo de predicados. Na lógica proposicional uma proposição só pode ter os seguintes valores: verdadeira ou falsa. Utilizam-se as premissas para derivar novas proposições ou inferências. Regras são usadas para determinar a verdade ou falsidade da nova proposição. As proposições podem ser ligadas através de conectores ou operadores lógicos formando, assim, as proposições compostas.

A lógica proposicional é pouco flexível para a representação do conhecimento nos SEs, pois nela, os conhecimentos sobre um determinado objeto ou conceito limitam-se aos valores verdadeiro ou falso.

No cálculo de predicados, ou lógica de predicados, os elementos fundamentais são, além dos objetos, os seus predicados, os quais são utilizados para representar os conhecimentos sobre o objeto, levando em consideração a estrutura interna das sentenças.

A lógica de predicados utiliza quantificadores que tornam as proposições mais exatas ou definidas, como por exemplo, $\forall$ (quantificador universal) e $\exists$ (quantificador existencial).

F) Listas e Árvores

Listas e árvores são estruturas simples para representar conhecimento hierárquico. São normalmente utilizadas para representar conhecimento, no qual os objetos são agrupados ou categorizados de acordo com seus relacionamentos. Os objetos são primeiramente divididos em grupos ou classes de itens similares. Então seus relacionamentos são mostrados através da ligação entre eles.

G) Modelo Orientado a objetos

Ao resolver um problema, interage-se com vários objetos (reais ou abstratos), e para cada um deles têm-se atributos e valores a eles associados. Esta representação, altamente intuitiva, é reproduzida no computador através da utilização de modelagem orientada a

objetos. Os mecanismos básicos desta tecnologia são: classes, objetos, mensagens, métodos e herança.

Segundo Waterman (1986), a utilização de objetos representa uma forma robusta de representação de conhecimento. Os objetos são definidos por suas classes, onde estão descritos os atributos que os objetos desta classe possuem e os seus métodos (funções que implementam as ações que o objeto pode realizar). Desta maneira, um objeto é uma instância da classe que o representa. Uma classe possui a seguinte estrutura básica:

Classe: tipo de entidade representada

Atributos 1..n: características da entidade, de um determinado tipo (texto, número, etc)

Métodos 1..m: procedimentos que podem ser executados por esta entidade – descrevem o seu comportamento em relação aos outros objetos

Esta tecnologia pode ser aproveitada na construção de sistemas especialistas devido os seguintes aspectos:

- Um objeto pode ser visto e tratado como um mecanismo de representação do conhecimento que se assemelha a um "frame";
- Objetos podem conter métodos que funcionem como regras de produção, seja alterando o próprio estado ou o estado de outros objetos que componham a aplicação;
- O encapsulamento dos dados possibilita uma fácil intercomunicação entre o sistema especialista e outros sistemas, bem como a reutilização de código;
- Aproveitamento das vantagens da programação orientada a objetos na construção de sistemas especialistas, como: rápido desenvolvimento, maior disponibilidade de ferramentas comerciais, proteção ao código, etc...

Apesar da semelhança com os quadros, representações orientadas a objeto são as únicas em que os objetos comunicam-se entre si enviando e recebendo mensagens (Waterman, 1986).

5.6.4. Implementação

Durante a etapa de implementação transforma-se o conhecimento formalizado em um programa computacional (Waterman, 1986). Um SE pode ser implementado utilizando-se uma linguagem de programação (C/C++, Pascal, Java, LISP, PROLOG) ou utilizando-se um ambiente *Shell*. Nesta etapa, todas as definições tomadas nas etapas anteriores serão colocadas à prova, principalmente a etapa de representação do conhecimento. Se houver algum problema, as decisões anteriores devem ser revisadas.

Uma decisão bastante delicada é escolher se será utilizada uma linguagem de programação ou uma *Shell*. Com a utilização da linguagem de programação, possui-se total controle sobre a implementação. A desvantagem é ter que implementar todas as partes do sistema, o que pode acarretar em tempos de execução e custos mais elevados, ou então em menos tempo previsto no cronograma do projeto para a aquisição do conhecimento, etapa fundamental para o sucesso do SE. Já em um ambiente *Shell* são fornecidos a máquina de inferência e os modelos de representação, o que torna a implementação mais barata, rápida e simplificada. Por outro lado, não se possui completo controle do sistema, principalmente da máquina de inferência.

5.6.5. Verificação e Validação

A etapa de verificação envolve a avaliação de performance e utilidade do sistema especialista desenvolvido. É importante que durante o desenvolvimento ocupe-se parte do tempo em testes e validação, a fim de proporcionar um sistema que atenda os requisitos de funcionalidade, confiabilidade, usabilidade e eficiência. Caso nesta etapa sejam descobertos erros, deve-se repará-los e fazer uma revisão das decisões tomadas nas etapas anteriores.

Alguns dos tipos de erros que podem ser encontrados nesta etapa são identificados a seguir:

- Erros de semântica: o significado do conhecimento implementado não está em conformidade com o conhecimento do especialista. As possíveis causas dos erros de semântica são: o engenheiro de conhecimento interpreta erroneamente uma explicação

do especialista; o especialista não interpreta corretamente o questionamento do engenheiro de conhecimento ou ambos;

- Erros de sintaxe: erros de escrita na linguagem utilizada, na maioria das vezes detectados pelo compilador.
- Erros de ambiente computacional: problemas de configuração, compatibilidade com sistema operacional, problemas na interface, entre outros;
- Erros de especificação: o sistema não atende os requisitos técnicos e funcionais definidos previamente;
- Erros de representação do conhecimento: similares aos erros de semântica, mas compreendem a base de conhecimento como um todo.

A validação do sistema especialista pode considerar a eficiência, precisão e credibilidade das soluções apresentadas, a interface com o usuário, a rapidez no processamento e a qualidade das soluções quando comparadas ao especialista humano.

Pode-se dizer que a verificação determina se o sistema foi construído corretamente e a validação determina se o sistema realiza o que era objetivado.

5.7. Sistemas Especialistas Baseados em Regras

Os SEs baseados em regras representam o conhecimento por meio de regras do tipo *se premissas, então conclusões*. Mesmo sendo a mais antiga, essa técnica ainda é muito usada em SEs experimentais e práticos, pois é uma forma intuitiva de representar o conhecimento. Essa classe de SE pode também ser modelada como um sistema de produção (Nilsson, 1998).

O controle de inferência dos SEs pode ser guiado por objetivo ou dados. Nos SEs guiados por objetivo, o processo de inferência inicia armazenando o objetivo (a solução para o problema) na memória de trabalho. Em seguida o controle de inferência busca por conclusões que coincidem com o objetivo armazenado, selecionando aquela regra e armazenando suas premissas na memória de trabalho. Esse procedimento corresponde a uma decomposição do problema (objetivo) em subproblemas mais simples (premissas), conforme ilustrado na Figura 5.5.

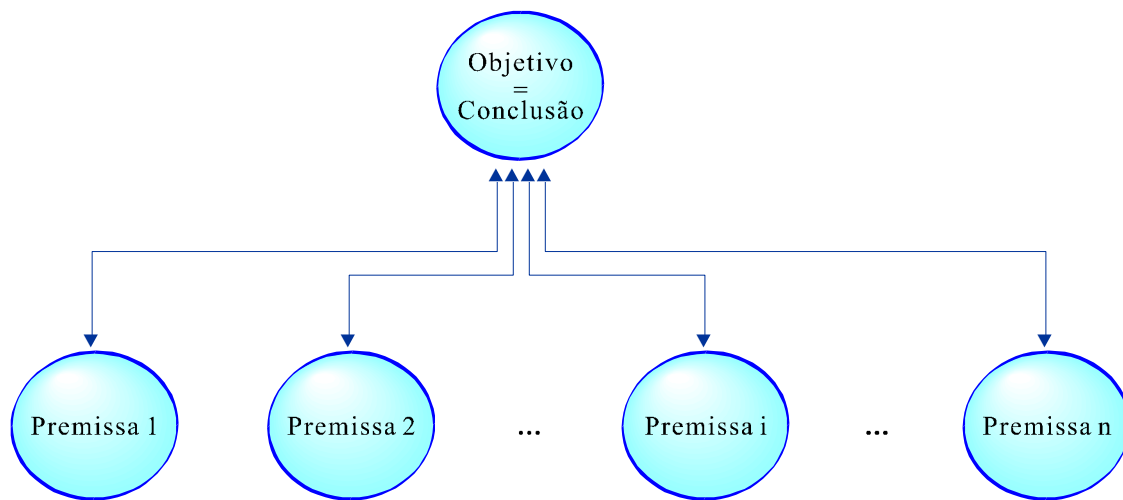


Figura 5.5 – Esquema de decomposição do problema

Nos sistemas guiados por dados, as condições de cada uma das regras são comparadas aos fatos existentes na memória de trabalho, considerando a ordem em que as regras estão armazenadas na base de conhecimento. Se os fatos armazenados na memória de trabalho confirmam uma das regras selecionadas, o resultado é inserido na memória de trabalho e o controle passa para próxima regra. Uma vez que todas as regras foram consideradas, a busca reinicia a partir do início do conjunto de regras. Esse processo continua até que o objetivo seja resolvido.

Um refinamento desse processo é chamado busca oportunista. O controle de inferência pode ser assim resumido: se a regra escolhida concluir novos fatos, o controle considera aquelas regras que tem esse novo fato como uma de suas premissas. Dessa forma qualquer fato concluído recentemente induz o processo de seleção de regras a escolher regras relacionadas com esse fato.

Com o objetivo de acelerar o processo de busca no espaço de soluções, podem-se ordenar as premissas das regras. Por exemplo, ordenam-se as premissas de uma regra de forma que aquela com maior possibilidade de falhar (ou confirmar) seja avaliada primeiro. Conseqüentemente, dá-se a oportunidade de eliminar regra (e, portanto, uma parte do espaço de soluções) mais cedo quanto possível, caracterizando uma poda do espaço de soluções. A ordem das regras na base de conhecimento, a organização das premissas nas regras e o custo de avaliação das regras são heurísticas que contribuem para o melhor desempenho do SE.

Problemas que caracterizam estágios na sua solução podem ser tratados por SEs, sendo necessário apenas incluir descritores associados a cada um dos estágios, inserindo-os como

primeira premissa de todas as regras pertencentes ao estágio. Deste modo, particiona-se a base de conhecimento, mantendo separado o conhecimento necessário à solução de cada estágio.

5.8. Outras técnicas

O raciocínio baseado em modelo (RBM) considera a estrutura do sistema e o comportamento individual de seus componentes, construindo modelos para representar adequadamente essas características.

Luger (2002) considera que um sistema com RBM deve incluir:

- A descrição de cada componente do sistema para simular o comportamento do sistema;
- A descrição da estrutura interna do sistema, representando os seus componentes e suas inter-relações;
- Diagnóstico de problemas, requerendo observações do desempenho das entradas e saídas do sistema.

Várias estruturas podem ser adotadas para construir o modelo utilizado pelo RBM. Entre outras se podem citar regras (representando a casualidade, funcionalidade e o relacionamento entre os componentes) e programas orientados a objetos (representando a estrutura interna dos componentes do sistema), onde os atributos dos objetos definem o estado do sistema e os métodos definindo sua funcionalidade.

As vantagens e desvantagens dos sistemas RBM são relacionados a seguir (Luger, 2002).

Vantagens

- Possibilidade de utilizar o conhecimento estrutural/funcional do domínio;
- Tende a ser um sistema robusto;
- Possibilidade de transferir o conhecimento entre processos;
- Podem fornecer explicações causais.

Desvantagens

- Requer um modelo preciso do domínio.
- Sistema complexo

- Podem surgir situações excepcionais inesperadamente durante o processo de inferência.

O raciocínio baseado em casos (RBC) é uma técnica de Inteligência Artificial para resolver novos problemas pela adaptação das soluções de problemas similares. O processo de inferência obtém suas conclusões a partir de uma memória de casos e experiências previamente armazenados. Os casos podem ser obtidos de especialistas humanos ou a partir de problemas resolvidos pelo próprio SE cujas soluções foram armazenadas adequadamente.

O primeiro SE referido na literatura científica usando RBC foi o sistema CYROS desenvolvido por Kolodner (Kolodner, 1983a e Kolodner, 1983b) no domínio de eventos políticos. Define os casos sob uma estrutura generalizada (episódio) que compartilham propriedades similares. Cada episódio generalizado (EG) possui três tipos de objetos:

- Normas - características comuns para todos os casos relacionados a um EG;
- Índices - características que diferenciam os casos relacionados em um GE. Um índice é composto de nome e valor;
- Índices apontando para casos ou para GE.

O RBC é usado numa grande variedade de processos de resolução de problemas e interpretação, incluindo julgamento, classificação, planejamento, diagnóstico e projeto. Em cada um destes, os casos são úteis para sugerir soluções e alertar para possíveis problemas que poderiam surgir (Lake, 1996).

A Figura 5.6 apresenta a arquitetura básica de um sistema RBC. Na figura pode-se observar um ciclo compreendendo quatro processos:

- Recuperação - recupera os casos similares ao novo caso;
- Reutilização - reutiliza a solução do caso recuperado no contexto do novo caso;
- Revisão - quando o caso recuperado não pode ser utilizado diretamente no novo caso, o caso recuperado é revisto adaptando a solução deste à solução do novo caso;
- Retenção - inclui na base de casos as informações úteis à solução de futuros casos.

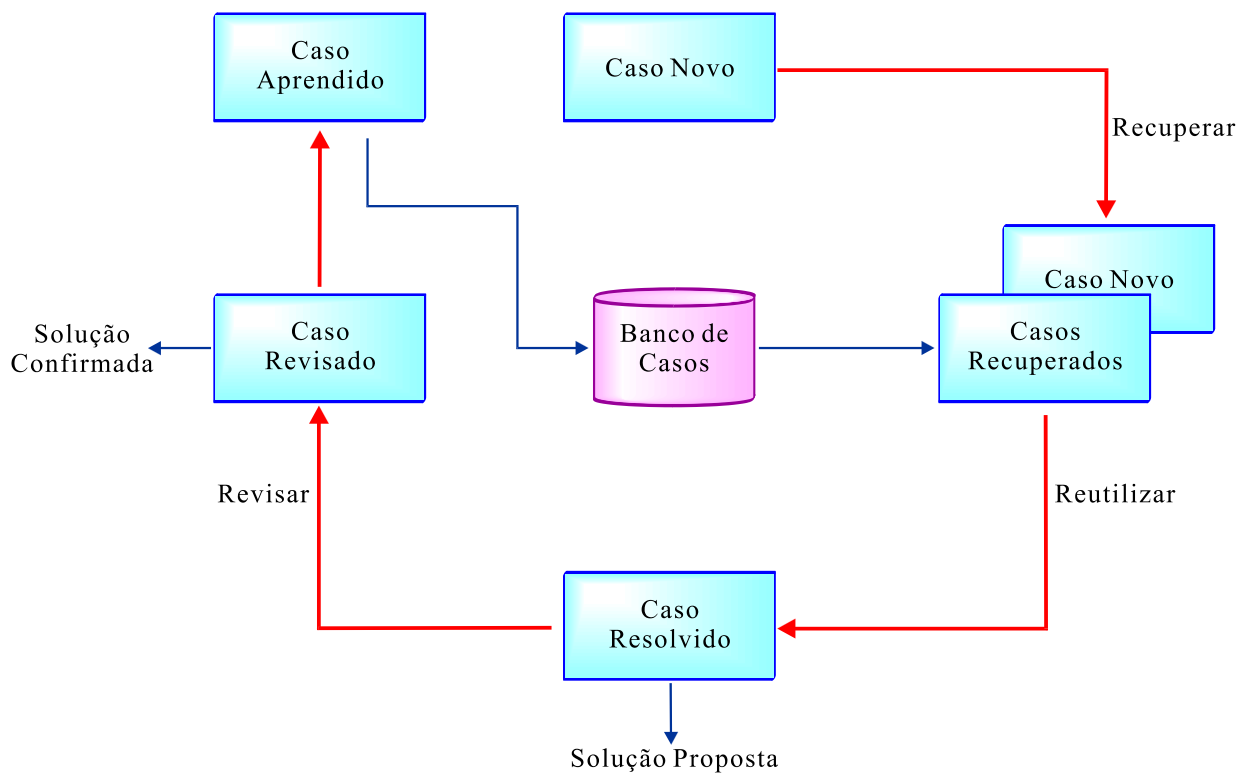


Figura 5.6 – Arquitetura básica de um sistema RBC

O caso em um RBC pode ser representado por tuplas relacionadas, árvores, regras do tipo situação-ação, entre outras. Nestas representações três componentes básicos estão presentes:

- Descrição do Problema - descrevem as características do problema de entrada, podendo ter a forma de nomes, números, funções ou textos para representar propriedades, qualidades, objetivos, metas, restrições ou condições;
- Descrição da Solução - descrevem as características da solução do caso;
- Conclusão - registra a avaliação cada vez que a solução é sugerida.

Segundo Luger (2002), as principais vantagens de um sistema RBC são:

- Adaptação de domínios difíceis de serem formalizados;
- Aquisição do conhecimento é agilizada;
- Reutilização do conhecimento armazenado;
- Técnicas de banco de dados podem ser utilizadas para representar os casos,

- Aprendizado por meio do registro dos novos casos;
- Justificativas consistentes.

A seguir são relacionadas algumas desvantagens dos sistemas RBC (Luger, 2002):

- Os casos não incluem conhecimento aprofundado do domínio;
- Uma base de casos com muitos registros pode comprometer o desempenho do sistema;
- É difícil a determinação da indexação dos casos adequada para armazenamento e recuperação dos casos.

Capítulo 6 - Implementação do Sistema

Especialista para Projeto de Execução da Rede

6.1. Introdução

Diversos são os aspectos a serem considerados durante a implementação de um sistema especialista. Dentre as muitas decisões temos: a forma de aquisição e representação do conhecimento; o método de inferência a ser utilizado e a utilização ou não de *shells* de sistemas especialistas.

O objetivo deste capítulo é documentar o processo de desenvolvimento do sistema, mostrando como cada etapa foi realizada e quais foram as decisões tomadas, baseadas nos conceitos apresentados no Capítulo 5 e nas características do problema a ser resolvido.

Na Seção 6.2 é apresentado o projeto conceitual do SE; a Seção 6.3 mostra as técnicas de aquisição e representação do conhecimento e a Seção 6.4 descreve a implementação do sistema especialista e a comunicação deste com o sistema de apoio à decisão descrito no Capítulo 3.

6.2. Projeto conceitual

O projeto conceitual tem por objetivo identificar se o problema a ser resolvido apresenta características que permitam a utilização de técnicas de sistemas especialistas, definir o público alvo do sistema, escolher entre a utilização de uma *shell* de sistema especialista e a implementação de uma máquina de inferência própria e decidir sobre o modelo de desenvolvimento a ser utilizado.

6.2.1. Identificação do problema

Antes de proceder à implementação de um sistema especialista é muito importante analisar se o problema abordado pode ser resolvido através da técnica de sistemas especialistas e quais são as vantagens que os usuários do sistema terão utilizando o sistema especialista ao invés de resolvê-lo empregando uma técnica de programação convencional.

No Capítulo 5, Seção 5.6.1, foram descritas algumas características que definem que um problema pode ser resolvido utilizando a técnica de sistemas especialistas. A seguir é realizada uma análise destas características no problema de automação do projeto de execução de uma rede elétrica.

- A tarefa de propor um projeto de execução de uma rede elétrica é bem delimitada, visto que possui um número limitado de entradas (características da rede elétrica) e saídas (equipamentos a serem instalados numa rede elétrica). Desta forma, não se tem explosão combinatória durante o processo de resolução;
- A definição de um projeto de execução de redes elétricas envolve em grande parte o processamento de símbolos (características qualitativas), ocorrendo pouco processamento numérico;
- Elaborar um projeto de execução de rede elétrica pode demorar de horas a dias, dependendo do tamanho e da complexidade da rede considerada. Algumas das tarefas são repetitivas e monótonas, induzindo ao erro;
- Os projetos de execução de rede elétrica são elaborados com frequência, sempre que há a formação de um novo loteamento ou são necessárias reformas na rede existente;
- As soluções obtidas pelos especialistas não são completamente consensuais, mas entre bons especialistas, as soluções costumam ser equivalentes em relação a custo e qualidade;
- Existe um especialista disposto a participar no desenvolvimento do SE. Trata-se de um profissional extremamente qualificado, bem articulado, podendo ser compreendido pelo engenheiro de conhecimento;
- A elaboração de um bom projeto de execução da rede elétrica pode proporcionar maior vida útil da rede, melhor desempenho e mais economia nos custos de execução.

Como o problema de elaboração de um projeto de execução de rede elétrica apresenta a maioria das características definidas na Seção 5.6.1, concluiu-se que o problema pode ser resolvido utilizando a técnica de sistemas especialistas. Nas seções a seguir são apresentadas as decisões tomadas nas demais etapas do projeto conceitual.

6.2.2. Definição do público alvo

Esta é uma etapa importante do projeto conceitual. Devem ser identificados quais são os profissionais que irão utilizar o sistema a ser desenvolvido e levar em consideração durante o desenvolvimento do sistema especialista as suas necessidades.

Os projetos de execução da rede elétrica são elaborados por projetistas com diferentes níveis de conhecimento e experiência. Vários projetistas possuem nível técnico e outros são engenheiros eletricitas. Em geral, os projetistas mais experientes e com maior conhecimento ficam responsáveis por projetos complexos e de alto valor de execução.

O sistema pode auxiliar estes dois tipos de projetistas, pois diminui consideravelmente o tempo necessário para a elaboração do projeto. Desta forma, os projetistas poderão dedicar maior tempo e atenção às decisões mais críticas do projeto e que poderão trazer melhores resultados, não despendendo elevado tempo na definição de todos os itens.

Além de auxiliar os projetistas na realização de seus trabalhos diários, o sistema também pode ser utilizado como uma ferramenta de auxílio no treinamento de novos projetistas.

6.2.3. Definição quanto à utilização de um *Shell* de sistema especialista

Uma decisão bastante delicada é escolher se será utilizada uma linguagem de programação ou uma *Shell*, como visto na seção 5.6.4.

Neste trabalho optou-se pela utilização de uma *Shell* de sistema especialista, a fim de poder focar grande parte do tempo e atenção nas etapas de aquisição e representação do conhecimento.

Existem diversas opções de *shells* de sistemas especialistas, tanto científicos quanto comerciais, disponíveis para utilização. Foi realizada uma pesquisa para definição do ambiente a ser utilizado no desenvolvimento do sistema.

A seguir serão apresentadas características de alguns ambientes:

- Expert Sinta: utiliza um modelo de representação do conhecimento baseado em regras de produção e fatores de confiança e possui construção automática de telas e menus. Desenvolvido pelo grupo SINTA (Sistemas INTeligentes Aplicados), da Universidade Federal do Ceará.

- KappaPC: permite utilização de um ambiente gráfico e geração de códigos padrão ANSI C. Permite a utilização de regras de produção e *frames* para o desenvolvimento e o uso da técnica de programação orientada a objetos. Desenvolvido pela Intellicorp, Inc.
- VP-Expert: sistema baseado em regras. Utiliza raciocínio para frente e possui mecanismos embutidos para o tratamento de imprecisão com o paradigma de fatores de confiança. Foi desenvolvido pela Paperback Software International de Berkeley, Califórnia.
- CLIPS: biblioteca de funções desenvolvidas na linguagem C. Permite a representação do conhecimento através de regras de produção e orientação a objetos. Foi desenvolvido pela NASA. A linguagem de desenvolvimento é o CLIPS, parecida com LISP.
- FuzzyCLIPS: além dos mecanismos de representação de conhecimento utilizados pelo CLIPS, utiliza a teoria e os cálculos da Lógica Fuzzy para representar o conhecimento.
- Jess: trata-se de uma extensão do CLIPS na linguagem Java, da Sandia National Laboratories. É um *expert system shell* que utiliza o CLIPS traduzido para JAVA e complementa as funcionalidades de um *expert system shell* para também ser um ambiente de desenvolvimento de aplicativos genéricos, incorporando componentes de interface gráfica do JAVA e permitindo a expansão do próprio JESS através da implementação de novas classes JAVA.

O ambiente escolhido para a implementação do sistema foi a Shell CLIPS versão 6.23 (C Language Integrated Production System). As origens do CLIPS datam de 1984 no Centro Espacial Johnson da NASA. Naquela época, o departamento de inteligência artificial tinha desenvolvido vários protótipos de aplicações de sistemas especialistas e, destas experiências, julgou que utilizar uma linguagem de programação convencional, tal como C, ao invés de LISP seria mais conveniente para implantação e manutenção de seus sistemas especialistas. A partir de então concentrou esforços no desenvolvimento do CLIPS, cuja primeira versão ficou pronta em 1985. A primeira liberação do CLIPS aos grupos fora da NASA, versão 3.0, ocorreu no verão de 1986 e vem sendo aperfeiçoada no decorrer dos anos. Atualmente o CLIPS é mantido por alguns de seus desenvolvedores como sistema de código aberto.

Os motivos que levaram a esta escolha são os seguintes:

- É possível criar a base de conhecimento do problema utilizando os recursos disponibilizados pela ferramenta;
- A ferramenta foi criada por pesquisadores de alto nível e tem sido utilizada com sucesso em muitas aplicações, ou seja, apresenta confiabilidade;
- Todas as funções disponibilizadas pela ferramenta podem ser utilizadas dentro de um sistema desenvolvido em C++, que é a linguagem escolhida para a implementação do sistema de apoio à decisão para projetos de redes elétricas, descrito na seção 3.6 e do qual o sistema especialista para elaboração de projetos de execução de redes elétricas fará parte.

6.2.4. Definição do mecanismo de inferência e algoritmo de unificação de padrões

O controle da máquina de inferência pode ser dirigido por metas em encadeamento para trás (*backward chaining*) ou em encadeamento para frente (*forward chaining*), conforme descrito na seção 5.5.3.

Para o desenvolvimento do sistema foi adotado o encadeamento para frente, uma vez que baseado nas características da rede elétrica deve-se decidir quais os equipamentos que farão parte do projeto de execução da rede.

O controle de inferência no CLIPS é com encadeamento para frente e se baseia no algoritmo de unificação de padrões RETE (Forgy, 1982), desenvolvido por Charles L. Forgy, na Carnegie-Mellon University, em 1979, em sua tese de Ph.D.

Este algoritmo tem por objetivo determinar quais regras têm seus antecedentes (premissas) satisfeitos. Caso o processo de unificação tivesse que acontecer apenas uma vez, então bastaria que a máquina de inferência examinasse cada regra e procurasse o conjunto de fatos que determinam se os padrões da regra serão satisfeitos.

Entretanto, em linguagens baseadas em regras o processo de unificação ocorre um grande número de vezes, sendo que a lista de fatos pode ser modificada durante cada ciclo de execução pela inclusão de novos fatos ou remoção de fatos antigos. Decorre destas modificações que

padrões não satisfeitos anteriormente sejam satisfeitos ou que padrões satisfeitos anteriormente não sejam satisfeitos. Assim, o problema da unificação ocorre continuamente, sendo que, a cada ciclo, o conjunto de regras que são satisfeitas deve ser atualizado. Neste caso, examinar cada regra à procura do conjunto de fatos que satisfazem os padrões da regra é um processo lento e ineficiente.

O algoritmo de RETE não realiza a unificação entre regras e fatos desta forma. Ele tira vantagem da propriedade de redundância temporal, que determina que as ações de uma regra mudarão apenas alguns fatos na lista de fatos. Cada ciclo de execução pode adicionar e/ou remover apenas uma pequena quantidade de fatos, e então, somente uma pequena parcela de regras é afetada pela mudança de fatos. Conclui-se, então, que como as regras permanecem estáticas e os fatos mudam, os fatos deveriam procurar as regras com os quais unificam. Este é o princípio do algoritmo de RETE, que faz isto armazenando o estado do processo de unificação a cada ciclo e recalcula as mudanças de um determinado estado utilizando apenas as mudanças que ocorreram na lista de fatos. O estado do processo de unificação é atualizado apenas se fatos são acrescentados ou removidos. Se o número de fatos acrescentados e removidos é pequeno quando comparado ao total de números de fatos e padrões, então, o processo de unificação será eficiente.

Como apenas os fatos modificados são processados na lista de fatos, deve-se armazenar para cada regra quais fatos já foram unificados a elas. Esta informação de estado é chamada unificação parcial. A grande desvantagem do algoritmo de RETE é o uso intensivo de memória.

6.2.5. Definição do modelo de ciclo de vida do sistema

O ciclo de vida de um software é um esquema de processo de desenvolvimento, identificando as principais fases, a ordem de realização e a interação entre estas fases. O ciclo de vida de software tipicamente inclui as fases: concepção, especificação de requisitos, arquitetura, design, implementação, testes, instalação e verificação, operação e manutenção, e às vezes, inclui também a fase de descarte, na qual é descontinuada a utilização do software (Pressman, 1995).

Para este trabalho foi escolhido o modelo de desenvolvimento incremental, que consiste em agregar incrementos de funcionalidade a cada nova versão do sistema. Com isto podem-se realizar testes e validações parciais junto ao especialista.

O modelo incremental de desenvolvimento de software propõe sua construção em pequenas partes operacionais, chamadas “incrementos” (Pressman, 1995), que são usados para

contínuas avaliações dos requisitos e detecções de falhas ou deficiências. No final do ciclo, um novo incremento é gerado, normalmente incorporando o incremento anterior.

No modelo incremental as tarefas são realizadas de forma iterativa, ou seja, são repetidas seguindo uma seqüência pré-definida, em que cada iteração representa um incremento na funcionalidade do sistema.

As etapas que constituem um incremento podem ser vistas na Figura 6.1.

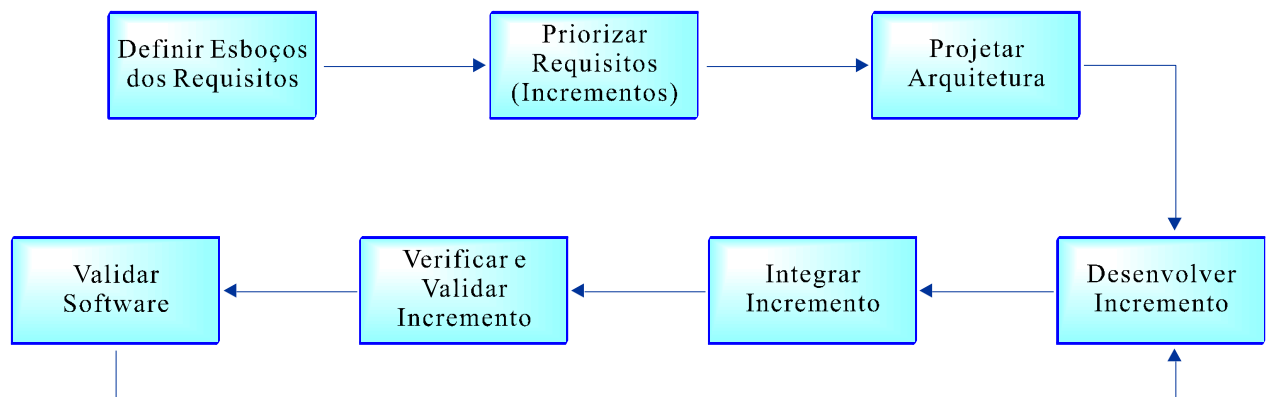


Figura 6.1 – Modelo Incremental

Após um determinado número de iterações o sistema é considerado adequado e está pronto para ser utilizado. As próximas etapas são as de operação e manutenção do sistema. A etapa de manutenção pode implicar um possível retorno às etapas de desenvolvimento.

Para o desenvolvimento do sistema foram definidas as etapas apresentadas na Figura 6.2, que seguem o modelo incremental.

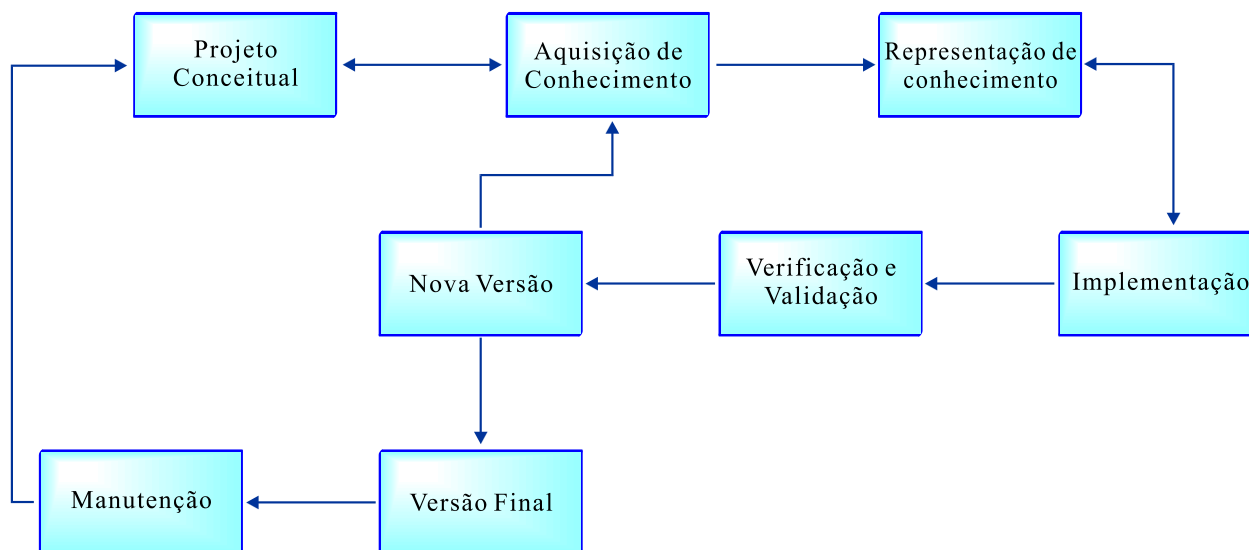


Figura 6.2 – Modelo Incremental do SE para projeto de execução

6.3. Aquisição do conhecimento

Como mencionado na Seção 5.6.2, antes de ser iniciada a etapa de aquisição de conhecimento, o engenheiro de conhecimento deve realizar um estudo preliminar a fim de se familiarizar com o domínio do problema a ser tratado. Desta forma é possível minimizar ou evitar problemas de comunicação com o especialista, decorrentes do não conhecimento de termos e jargões técnicos, da falta de conhecimento técnico para formular perguntas de forma clara e da incapacidade de compreender as explicações fornecidas pelo especialista.

Neste trabalho, este estudo preliminar se mostrou indispensável, devido à formação acadêmica do engenheiro de conhecimento, que não engloba assuntos como o funcionamento do sistema de distribuição de energia elétrica e os possíveis equipamentos a serem instalados numa rede elétrica. Para se familiarizar com o domínio, o engenheiro de conhecimento consultou bibliografia técnica especializada.

O processo de aquisição de conhecimento constituiu-se da leitura de normas técnicas, estudo de projetos de execução de rede disponíveis e entrevistas com o especialista. A seguir, descreve-se cada um destes procedimentos.

6.3.1. Leitura de normas técnicas

A leitura de normas técnicas da agência reguladora do setor elétrico e de uma empresa fornecedora de energia elétrica permitiu uma maior familiarização com os termos técnicos do domínio de conhecimento.

As normas descrevem os diversos equipamentos a serem instalados em redes de distribuição de energia elétrica, bem como as restrições a serem respeitadas por motivo de segurança e desempenho.

Foram consultadas normas relativas ao projeto de alimentadores e ramais; iluminação pública; ligação de clientes; loteamentos e núcleos habitacionais e melhoramentos na rede de distribuição. Também foram consultadas normas que estabelecem a padronização de: estruturas para redes aéreas compactas (rede primária) de distribuição de energia elétrica; estruturas para redes aéreas nuas (rede primária e rede secundária) de distribuição de energia elétrica; estruturas para redes multiplexadas (rede secundária) de distribuição de energia elétrica; equipamentos utilizados para iluminação pública; transformadores de distribuição e equipamentos de segurança (para-raios e chaves).

Vários foram os conhecimentos específicos adquiridos com a leitura das normas. Entretanto, mesmo após a realização desta etapa, faltava uma visão mais ampla do encadeamento dos procedimentos (e decisões tomadas) para a elaboração de um projeto de execução de rede elétrica.

6.3.2. Estudos de projetos de execução de rede disponíveis

Ao estudar projetos de execução de rede propostos é possível que se adquira conhecimento através dos casos ali contemplados. Durante estes estudos, visualizam-se diversas configurações de redes elétricas de distribuição de energia elétrica e as respectivas escolhas de estruturas primárias, estruturas secundárias, postes e demais equipamentos instalados.

O estudo dos projetos existentes proporcionou uma visão mais geral dos passos envolvidos na elaboração de um projeto de execução.

6.3.3. Entrevistas com o especialista

Uma das principais dificuldades encontradas no desenvolvimento de um sistema especialista está relacionada à disponibilidade de um especialista no domínio. Neste trabalho contou-se com a colaboração de um especialista, o qual participou de poucas entrevistas na etapa de aquisição do conhecimento e se mostrou disponível para o esclarecimento de dúvidas.

Nas entrevistas com o especialista procurou-se entender todo o processo de elaboração de um projeto de execução da rede de distribuição de energia elétrica, quais são as características consideradas e as opções de estruturas primárias e secundárias, postes e demais equipamentos existentes. A partir destas entrevistas foi possível identificar parâmetros da rede a serem considerados e a relação destes parâmetros aos equipamentos.

Durante este processo foi constatada a dificuldade apontada por Waterman (1986), que consiste no fato dos especialistas resolverem o problema intuitivamente, baseados em sua grande experiência, sem utilizar regras ou estratégias, mesmo que estas existam. Houve muita dificuldade no detalhamento dos procedimentos realizados e informações utilizadas para se chegar a determinadas escolhas de equipamentos. Durante a explicação dos procedimentos foi bastante comum o especialista omitir passos importantes, sem os quais o engenheiro de conhecimento não conseguiria reproduzir o processo de tomada de decisão. Nestas situações, o engenheiro de conhecimento procurou entender o procedimento utilizado pelo especialista através da discussão das decisões tomadas em exemplos simplificados.

Ao final da etapa de aquisição de conhecimento foi possível verificar o quanto ela é crítica e árdua, conforme o que afirma a literatura técnica acerca de sistemas especialistas.

6.4. Representação do conhecimento

Conforme descrito na seção 5.6.3, existem diversas formas de representar o conhecimento, passíveis de serem empregadas tanto durante a etapa de aquisição do conhecimento quanto durante a etapa de implementação do sistema. A seguir são apresentadas as técnicas utilizadas neste trabalho.

6.4.1. Triplas OAV (Objeto-Atributo-Valor)

Várias tabelas constituídas de triplas OAV foram criadas durante os estudos preliminares e refinadas durante a etapa de aquisição do conhecimento. Os dados contidos nestas tabelas referem-se principalmente aos tipos e características dos elementos presentes nas redes de distribuição de energia elétrica. A utilização desta técnica de representação do conhecimento permitiu um maior controle das informações obtidas, maior facilidade na recuperação do conhecimento e mostrou-se uma boa forma de documentar as informações. Na Tabela 6.1 é mostrado um pequeno exemplo da tabela de triplas OAV criada para as estruturas primárias. O objeto estrutura primária possui os atributos: Tipo de rede em que é utilizada, Tipo de situação em que é utilizada e Tipo de espaçamento em que é colocada. Em cada linha da tabela são apresentados os valores assumidos pelos atributos para o objeto.

Estrutura	Tipo de rede em que é utilizada	Tipo de situação em que é utilizada	Tipo de espaçamento em que é colocada
CE3N3	Transição entre rede compacta e rede nua		Espaçamento normal
CE3B3	Transição entre rede compacta e rede nua		Espaçamento beco
CE3SHN3	Compacta	Derivação	Indiferente
CE3	Compacta	Fim de linha	Indiferente
CE1	Compacta	Passante com deflexão entre os cabos de até 6 graus	Indiferente
N2	Nua	Fim de linha envolvendo cabo A02 e Passante com deflexão entre os cabos em limites pré-estabelecidos, de acordo com o cabo.	Normal
M4	Nua	Mudança de bitola não	Meio-beco

Estrutura	Tipo de rede em que é utilizada	Tipo de situação em que é utilizada	Tipo de espaçamento em que é colocada
		envolvendo o cabo A02 e Passante com deflexão entre os cabos em limites pré-estabelecidos, de acordo com o cabo.	
N2-N2	Nua	Derivação	Normal

Tabela 6.1 – Tabela de triplas OAV

6.4.2. Árvores de contexto e de decisão

A partir das normas técnicas foram criadas árvores de contexto, para agrupar os diversos conjuntos. Durante a fase de interação com o especialista, para cada um dos contextos definidos, foram criadas as árvores de decisão, baseadas nas respostas por ele fornecidas. Esta técnica tem como principal vantagem a facilidade de visualização, tornando mais simples a geração das regras a serem codificadas no sistema, em comparação à geração das regras diretamente dos textos elaborados a partir das respostas dos especialista.

A Figura 6.3 representa como foram divididos os contextos para geração das árvores de decisão, em que os elementos estão agrupados em grandes conjuntos.

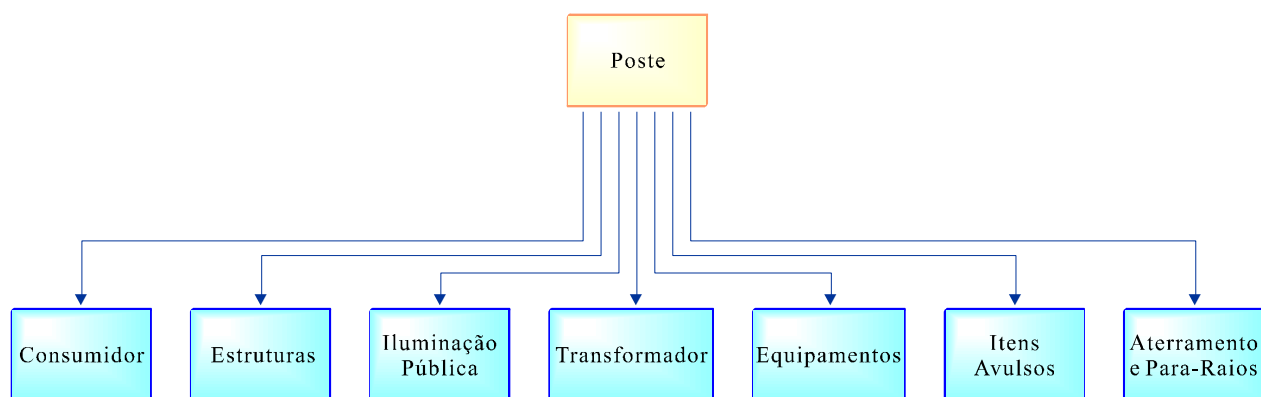


Figura 6.3 – Divisão dos contextos

Os detalhes de cada conjunto podem ser visualizados nas Figuras 6.4 a 6.7, em que os elementos de rede estão sempre em último nível (nível folha) das árvores de contexto.

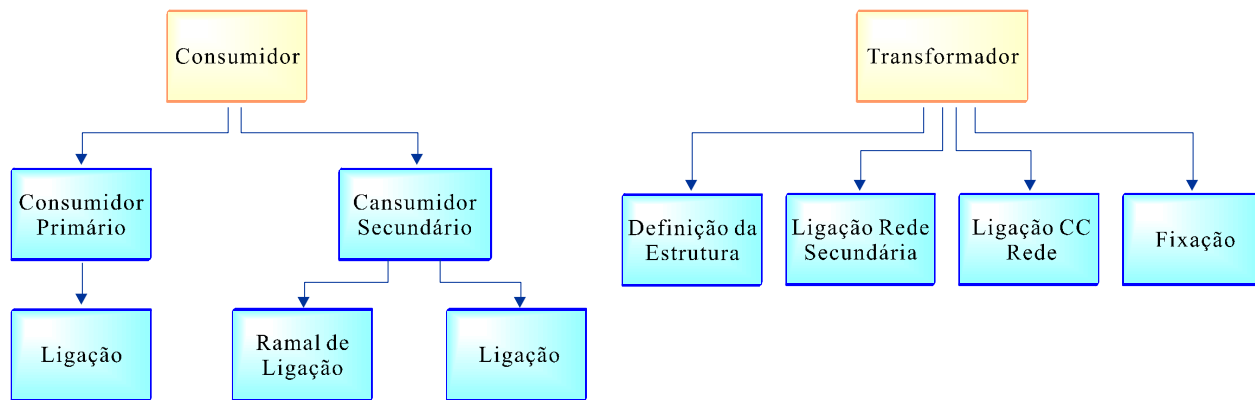


Figura 6.4 - Conjuntos consumidor e transformador

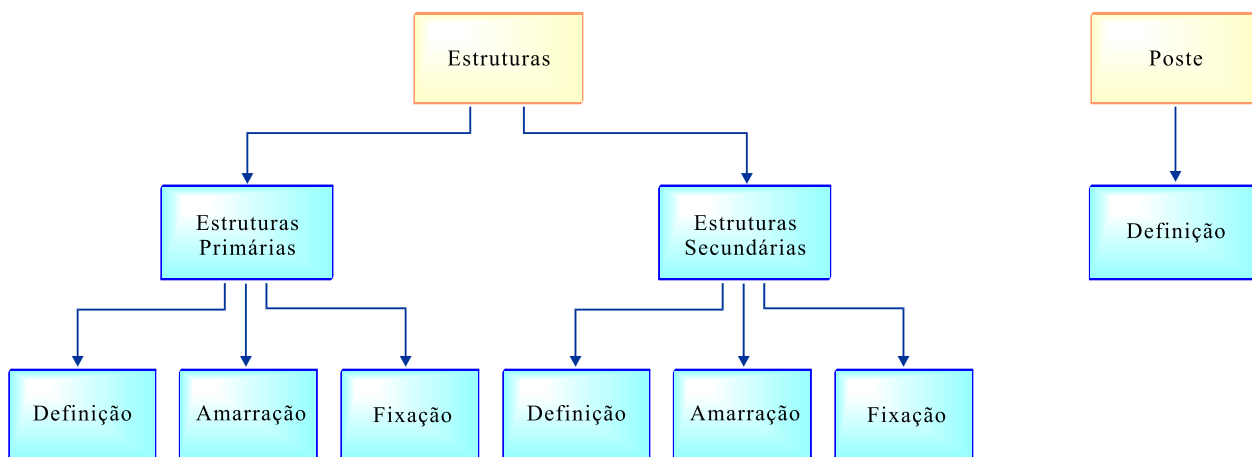


Figura 6.5 - Conjuntos estruturas e poste

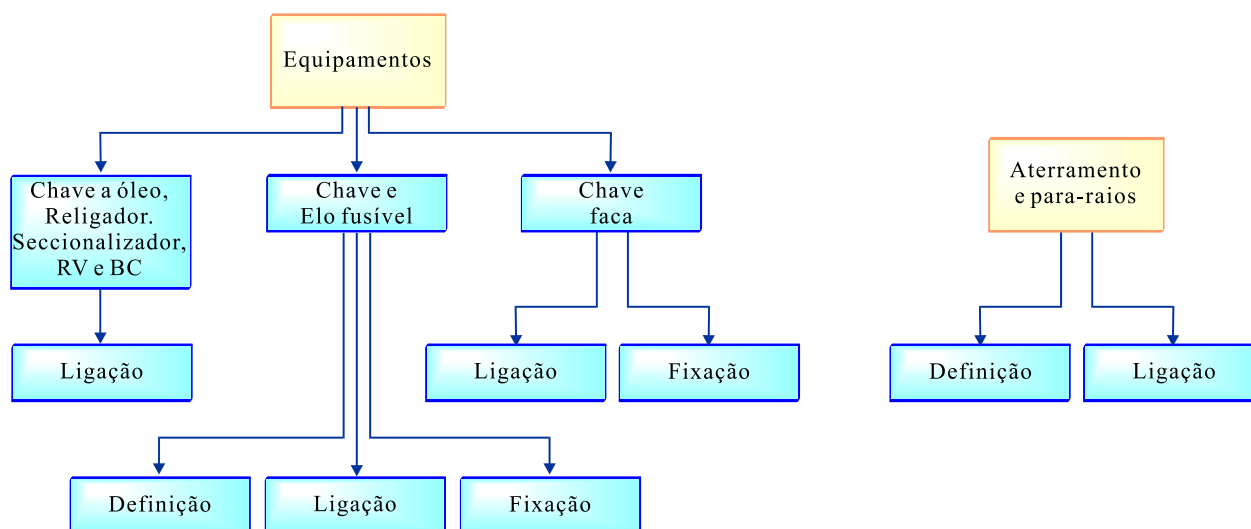


Figura 6.6 - Conjuntos equipamentos e aterramento/pára-raios

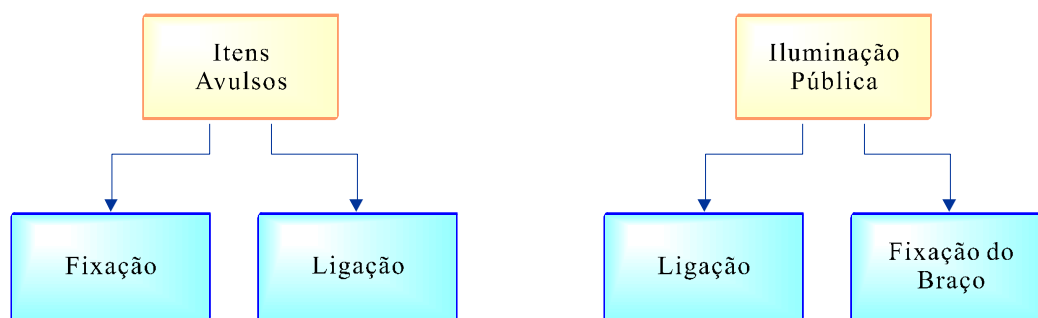


Figura 6.7 - Conjuntos itens avulsos e iluminação pública

O dimensionamento do poste é obtido após a execução do cálculo mecânico. Porém, para executá-lo é necessário definir as estruturas primárias e secundárias, assim como a altura do poste. A definição dos elementos segue a dependência abaixo.

1. Definição das estruturas primárias e secundárias;
2. Definição da altura do poste;
3. Cálculo mecânico;
4. Definição do poste;
5. Decisões dos demais elementos.

A seguir, apresentam-se exemplos dos atributos e respectivas árvores de decisão dos principais elementos de rede.

Definição do Poste

Os atributos que influenciam na escolha do tipo de poste são:

- Poste participa de um cruzamento aéreo;
- Presença de rede primária;
- Presença de transformador, banco capacitor, chave a óleo ou derivação com chave faca ou fusível;
- Cálculo mecânico.

A Figura 6.8 apresenta a árvore de decisão para elementos do tipo poste.

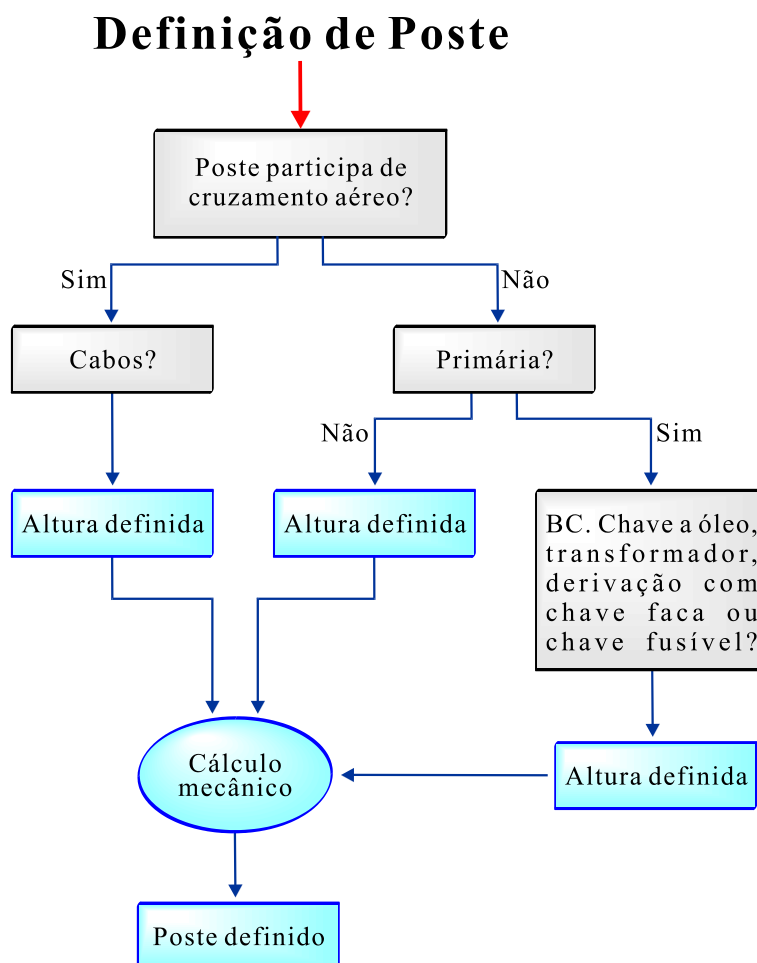


Figura 6.8 - Árvore de decisão para elementos do tipo poste

Definição da Estrutura Primária

Os atributos que influenciam a decisão da estrutura primária são:

- Tipo da rede (compacta ou cabos nus);
- Posição da estrutura no poste (normal, meio-beco ou beco);
- Cabo;
- Situação (fim de linha, derivação ou passante);
- Ângulo do cabo em relação à estrutura;
- Mudança de bitola.

A Figura 6.9 apresenta a árvore de decisão para elementos do tipo estrutura primária.

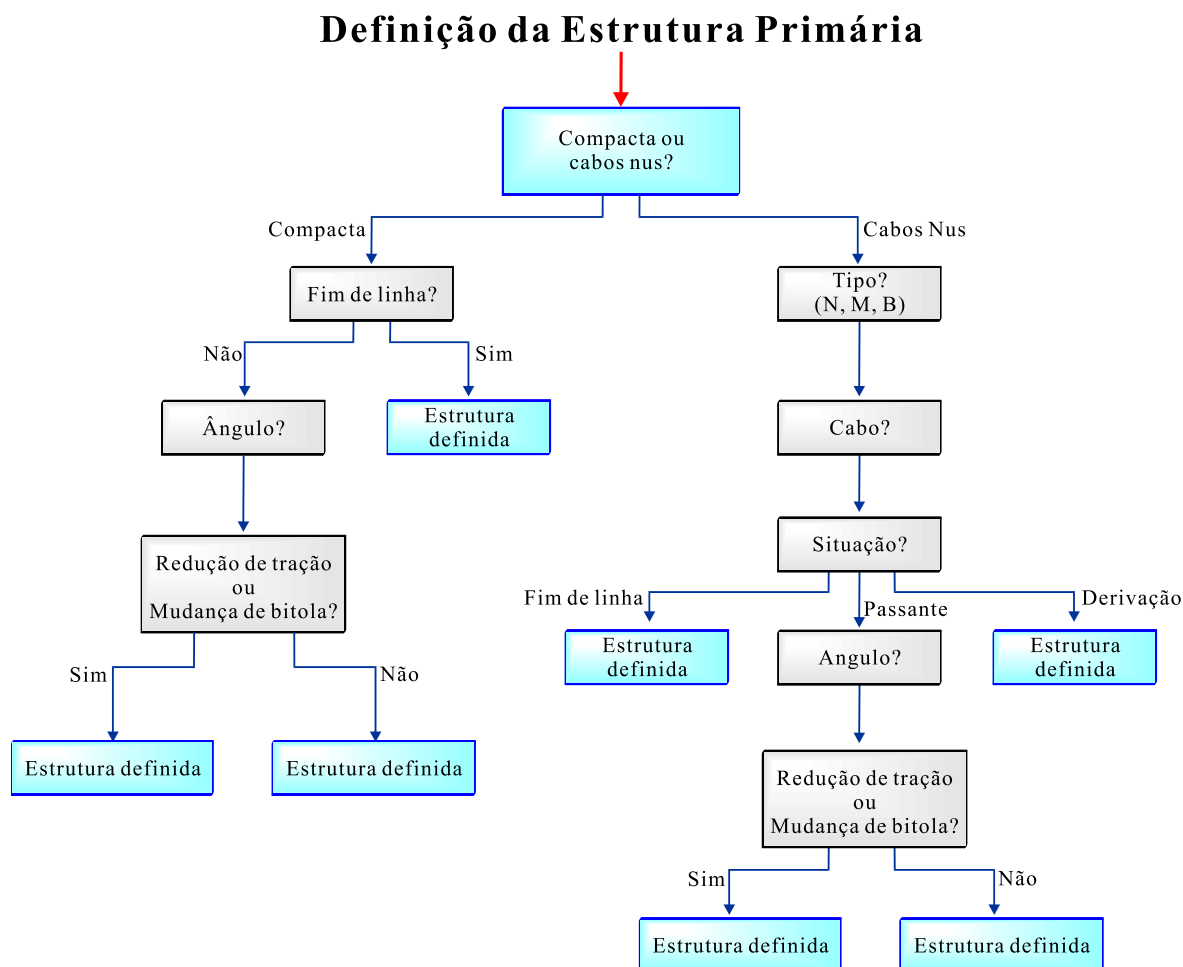


Figura 6.9 - Árvore de decisão para elementos do tipo estrutura primária

Definição da Estrutura Secundária

Os atributos que influenciam a decisão da estrutura secundária são:

- Tipo da rede (multiplexada ou cabos nus);
- Situação (tangente, fim de linha ou derivação);
- Quantidade cabos (número de fases + neutro).

A Figura 6.10 apresenta a árvore de decisão para elementos do tipo estrutura secundária.

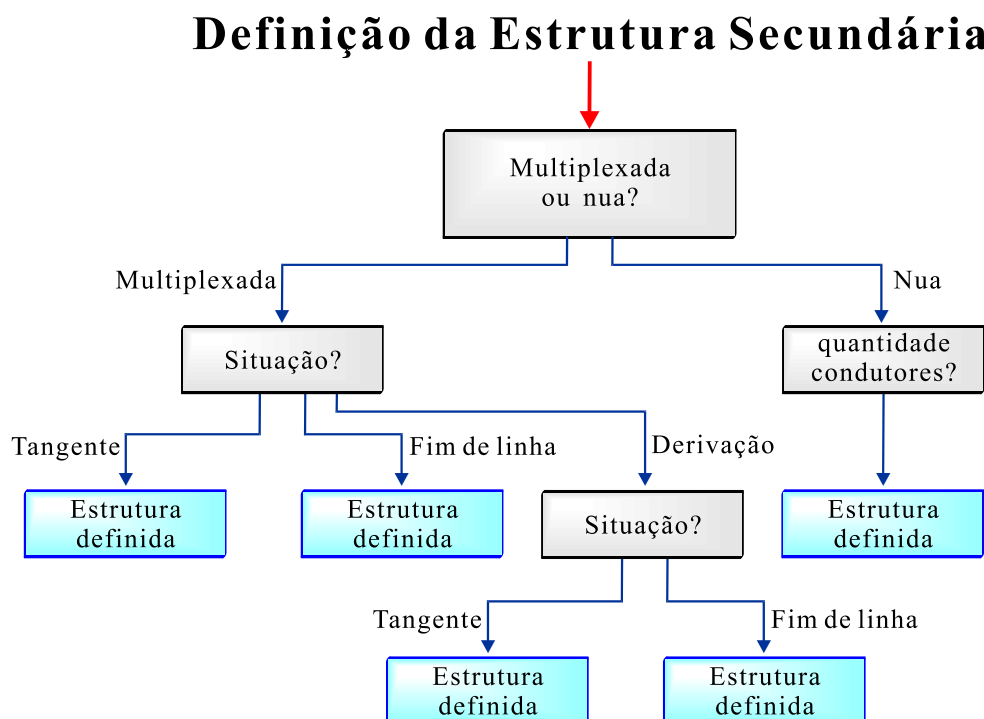


Figura 6.10 - Árvore de decisão para elementos do tipo estrutura secundária

Definição de Amarração Primária

Os atributos que influenciam a decisão da amarração primária são:

- Estrutura primária;
- Cabo;
- Ângulo do cabo em relação à estrutura;
- Encabeçamento com neutro.

A Figura 6.11 apresenta a árvore de decisão para elementos do tipo amarração primária.

Definição da Amarração Primária

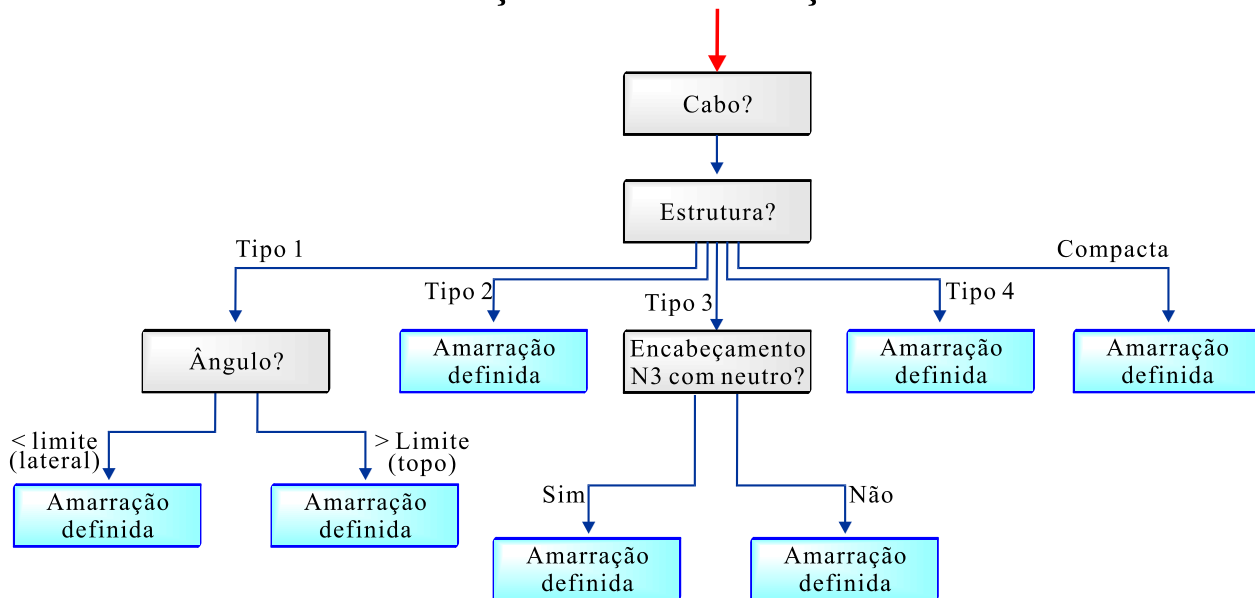


Figura 6.11 - Árvore de decisão para elementos do tipo amarração primária

Definição de Amarração Secundária

As variáveis que influenciam a decisão da amarração secundária são:

- Tipo da rede (multiplexada ou cabos nus);
- Situação (tangente, encabeçamento ou seccionamento);
- Cabo;
- Quantidade de cabos (número de fases + neutro).

A Figura 6.12 apresenta a árvore de decisão para elementos do tipo amarração secundária.

Definição da Amarração Secundária

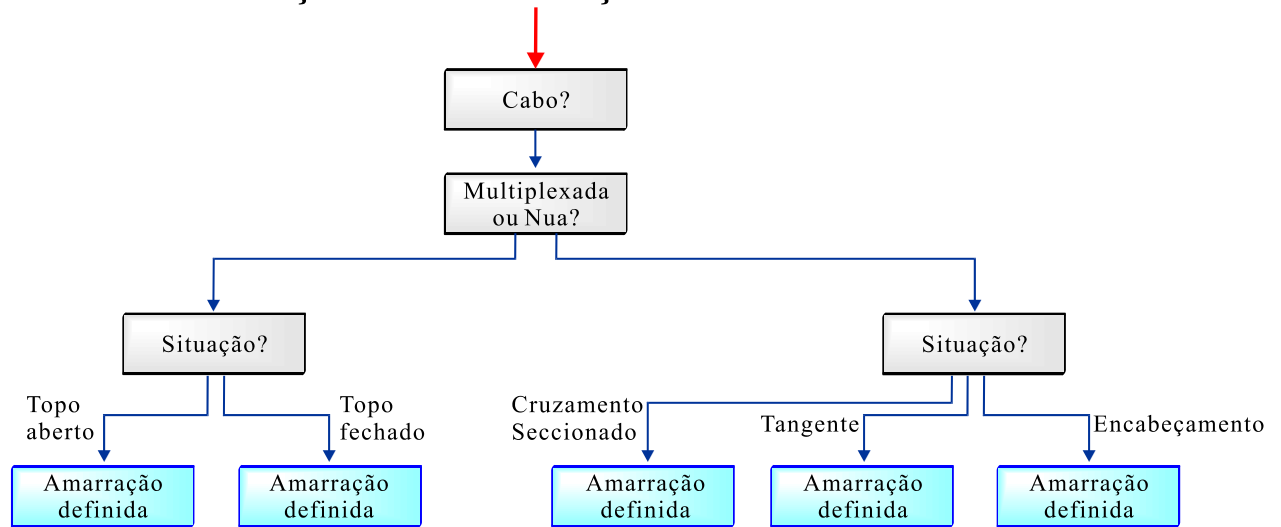


Figura 6.12 - Árvore de decisão para elementos do tipo amarração secundária

6.4.3. Classes

Para a representação das entidades envolvidas na elaboração de um projeto de execução de rede de distribuição de energia elétrica optou-se pela utilização da modelagem orientada a objetos, devido às vantagens apresentadas na Seção 5.6.3.

6.4.4. Regras

Para a utilização da máquina de inferência da *shell* CLIPS a base de conhecimento foi dividida de acordo com as árvores de contexto e o conhecimento modelado na forma de regras de produção, descritas na seção 5.6.3. A seguir são apresentadas algumas regras codificadas no sistema (escritas aqui em pseudocódigo), criadas a partir das árvores de decisão elaboradas.

Exemplos de regras para definição do tipo de rede secundária

Exemplo 1:

SE “rede secundária é proposta”
E “existe apenas um cabo secundário no poste”
E “a família deste cabo é multiplexada”
ENTÃO “a rede secundária é multiplexada”

Exemplo 2:

SE “rede secundária é proposta”
E “existe apenas um cabo secundário no poste”
E “a família deste cabo é nua”
ENTÃO “a rede secundária é nua”

Exemplo 3:

SE “rede secundária é proposta”
E “existem dois cabos secundários no poste”
E “a família dos dois cabos é multiplexada”
ENTÃO “a rede secundária é multiplexada”

Exemplo 4:

SE “rede secundária é proposta”
E “existem dois cabos secundários no poste”
E “a família dos dois cabos é nua”
ENTÃO “a rede secundária é nua”

Exemplo 5:

SE “rede secundária é proposta”
E “existem dois cabos secundários no poste”
E “a família dos dois cabos são diferentes”
ENTÃO “a rede secundária é uma rede de transição”

Exemplos de regras para determinação da situação da rede secundária (fim de linha, passante, mudança de bitola, fim de circuito ou derivação)

Exemplo 6

SE “a rede secundária é proposta”

E “existe apenas um cabo secundário no poste”

ENTÃO “a situação da rede secundária no poste é fim de linha”

Exemplo 7

SE “a rede secundária é proposta”

E “existem dois cabos secundários no poste”

E “os dois cabos secundários são iguais”

E “os dois cabos fazem parte do mesmo circuito de rede secundária”

ENTÃO “a situação da rede secundária no poste é passante”

Exemplo 8

SE “a rede secundária é proposta”

E “existem dois cabos secundários no poste”

E “os dois cabos secundários não são iguais”

E “os dois cabos fazem parte do mesmo circuito de rede secundária”

ENTÃO “a situação da rede secundária no poste é mudança de bitola”

Exemplo 9

SE “a rede secundária é proposta”

E “existem dois cabos secundários no poste”

E “os dois cabos não fazem parte do mesmo circuito de rede secundária”

ENTÃO “a situação da rede secundária no poste é fim de circuito”

Exemplo 10

SE “a rede secundária é proposta”

E “existem três cabos secundários no poste”

E “os três cabos fazem parte do mesmo circuito de rede secundária”

ENTÃO “a situação da rede secundária no poste é derivação”

A representação das regras no CLIPS deve respeitar a seguinte sintaxe:

```
(defrule nome_da_regra
(premissa 1)
(premissa 2)
...
(premissa n)
=>
(conclusão 1)
(conclusão 2)
...
(conclusão n))
```

Para o exemplo 10 apresentado tem-se a seguinte regra:

```
(defrule regra_d4
(rede_prim p)
(num_cabos_prim 3)
(familia_cabo_prim1 ?tipo1)
(familia_cabo_prim2 ?tipo2)
(familia_cabo_prim3 ?tipo3)
(test (eq ?tipo1 ?tipo2 ?tipo3))
=>
(assert (situacao_prim derivacao))
(printout resultado crlf "derivacao"))
```

A criação da base de conhecimento demandou um tempo elevado, devido à codificação não trivial das regras no CLIPS e também ao grande número de regras necessárias para inferir os diversos elementos construtivos da rede (foram modeladas mais de 1500 regras).

Uma alternativa para diminuir o tempo necessário para a criação da base de conhecimento é a implementação de um editor gráfico que permita codificar as regras de maneira mais intuitiva e faça uma tradução das regras criadas para a sintaxe do CLIPS.

6.5. Implementação computacional e integração ao sistema de apoio à decisão para projetos de redes elétricas

O módulo Projeto de Execução (veja Fig. 3.5) detalha cada elemento da rede elétrica de distribuição nos componentes físicos (estruturas, fixação de estruturas, tipo de poste, amarrações) que irão compor a rede. Este módulo foi construído baseado na técnica de Sistemas Especialistas, utilizando a *shell* CLIPS integrada a um programa desenvolvido na linguagem de programação C++. A plataforma computacional sobre a qual o sistema é executado é o sistema operacional Windows.

O módulo recebe como entrada arquivos de dados com informações sobre a rede de distribuição. As informações da rede são convertidas em fatos, que são carregados no CLIPS. A partir de então, a máquina de inferência realiza a unificação entre os fatos e as regras contidas na base de conhecimento e realiza as inferências que determinam os elementos de rede, conforme ilustra a Figura 6.13.

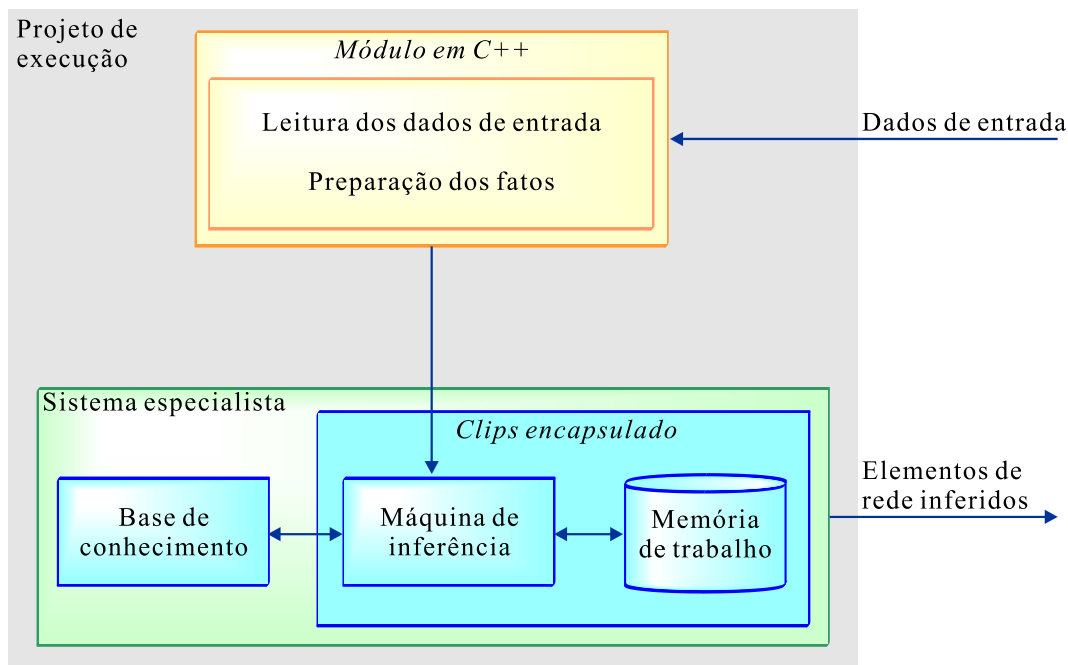


Figura 6.13 – Arquitetura do módulo Projeto de Execução

A seguir são apresentados exemplos dos formatos dos arquivos de entrada e saída (neste caso para estrutura primária e estrutura secundária):

Elemento Construtivo	Formato do arquivo de entrada	Formato do arquivo de saída
Estrutura Primária	Número de postes Para cada poste ID_do_poste Número de pontos elétricos Potência_trafo (0 se não tiver) Para cada ponto elétrico (PE) Id_PE Número_sementos Para cada semento IdSegmento arranjo ângulo status(p-e) Extremidade(f-c) tipo(c-n-b-m)	Número de postes Para cada um dos postes ID_poste;Núm_PE's Para cada ponto elétrico (PE) Id_PE;Estrutura;Altura Relação dos ID's dos segmentos(Id_Segm1;Id_Segm2;...)
Estrutura Secundária	Número de postes Para cada poste ID_poste Núm_PE's Para cada PE Id_PE Número_segmentos ramais(S-N) Para cada semento IdSegmento arranjo ângulo status(p-e) circuito	Número de postes Para cada poste ID_poste;Núm_PE's Para cada PE Id_PE;Estrutura Relação dos ID's dos segmentos(Id_Segm1;Id_Segm2;...)

Para cada um dos elementos construtivos foram definidos os formatos dos arquivos de entrada e de saída, permitindo que o sistema especialista seja utilizado para definir todos os tipos de elementos construtivos ou apenas os escolhidos pelo usuário.

Como o sistema especialista para elaboração de projetos de execução de redes de distribuição de energia elétrica faz parte de um sistema mais amplo - o sistema de apoio à decisão para projeto de redes elétricas – ele deve se comunicar à interface e ao módulo de cálculo mecânico.

A Seção 6.5.1 descreve como foi implementado o mecanismo de integração entre os diversos módulos do sistema de apoio à decisão. A Seção 6.5.2 apresenta como o módulo sistema especialista é utilizado no protótipo do sistema de apoio à decisão.

6.5.1. Arquitetura de integração

O sistema de apoio à decisão para elaboração de redes de distribuição de energia elétrica requer um certo grau de independência entre as etapas do projeto de tal modo que a concorrência entre elas seja possível. Isso se evidencia através da observação da arquitetura proposta e tomando-se uma situação muito comum: enquanto um modelo está em uso, resolvendo uma determinada tarefa como o dimensionamento elétrico de uma rede, a Interface pode permitir ao usuário que consulte certos elementos físicos incluídos no projeto.

O módulo Controle encarrega-se de garantir esta concorrência, assegurando que um determinado modelo não seja executado quando o mesmo já estiver em uso. Outra função deste módulo é a troca de informação entre os modelos, garantindo a existência dos dados de entrada necessários para um modelo, mas deixando a verificação de consistência a cargo do mesmo. É possível entender este módulo como uma máquina de estados, capaz de realizar procedimentos bem definidos, mas que não tenham uma ordem de execução pré-estabelecida.

Diante desses requisitos e da plataforma computacional escolhida, o sistema operacional Windows, foi concebida uma arquitetura capaz de proporcionar a execução de um módulo com seus respectivos parâmetros, bem como a coleta dos resultados, compreendendo um ambiente multitarefa onde cada módulo concorre a uma fatia de tempo da CPU. Na verdade, buscou-se utilizar os recursos disponibilizados pelo Windows para vincular os módulos a processos do sistema operacional, o qual se encarrega de escaloná-los.

Esses recursos são disponibilizados pelo Windows em uma Interface para Programação de Aplicações (API), na qual optou-se por funcionalidades comuns nas diversas versões deste sistema operacional. Mais especificamente, utilizou-se a interface de usuário associada ao componente básico deste sistema: as janelas. Usa-se, portanto, mecanismos providos pelo Windows para a passagem de informação entre janelas, sempre considerando que este sistema é dirigido a eventos. Isso significa conceitualmente que uma determinada janela fica indefinidamente respondendo a eventos gerados pelo usuário ou pela própria janela, cada um deles associado a um procedimento definido. Para processar estes eventos, toda janela deve

incluir um procedimento padrão (“WindowProcedure”) chamado sempre que houver um evento relativo àquela janela. A mensagem de uma janela para outra corresponde a um evento na janela destino disparado pela janela origem, com o conteúdo da mensagem incluso nos parâmetros desse procedimento padrão que trata os eventos. Como há grande diferença entre o tamanho das mensagens entre os módulos, optou-se por passar na mensagem somente informações básicas, deixando a parte mais onerosa para ser passada através de arquivos.

Dessa forma, todas as estruturas de dados complexas são incluídas em arquivos e a mensagem entre as janelas contém apenas o nome dos mesmos. A Figura 6.14 apresenta a estrutura de dados utilizada para a mensagem. Ela é de tamanho fixo devido a uma exigência da API do Windows e reúne números inteiros, reais e cadeias de caracteres, com 6 unidades de cada um destes três tipos. Qualquer comunicação envolve a mesma mensagem, cabendo aos módulos a adequação da mesma para as suas necessidades através da correta inicialização dos campos.

```
estrutura mensagem
{
  int tipo
  int num inteiros
  long inteiros[6]
  int num reais
  double reais[6]
  int num palavras
  char palavras[6][300]
}
```

Figura 6.14 - Estrutura de dados da mensagem

As Figuras 6.15 e 6.16 apresentam os dois procedimentos básicos em pseudocódigo de um módulo que faz uso dessa API do Windows, salientando-se que eles foram codificados em linguagem C e traduzidos para o código nativo do Windows através do compilador GNU-gcc. Contudo, outros compiladores proprietários como o C++ Builder da Borland e o Microsoft Visual C++ também foram testados com sucesso.

```

int WINAPI WinMain()
1. ...
2. enquanto( ObtemMensagem(mens) = 0
3. {
4.   TraduzMensagem(mens)
5.   EnviaMensagem(mens)
6. }
7. retorna(0)

```

Figura 6.15 - Função principal do aplicativo que utiliza API do Windows

```

int WinProcedure(mens)
1. escolha(mens)
2. {
3.   caso FINALIZA: Finaliza()
4.   caso RECEBE: Processa(mens)
5.   caso ENVIA: Envia(mens)
6. }
7. retorna(0)

```

Figura 6.16 - Função para processar as mensagens

A primeira função, apresentada na Figura 6.16, corresponde à função principal da aplicação, ou seja, a primeira função que é invocada sempre que a aplicação é executada. Percebe-se pelos passos 2-6 que a função fica indefinidamente respondendo a eventos até que um tipo particular deles seja invocado para encerrar a execução (evento que cause uma mensagem nula). A etapa de tradução da mensagem, passo 4, corresponde à conversão dos dados de uma estrutura particular utilizada pelo Windows para a estrutura de dados definida, apresentada anteriormente na Figura 6.14. A próxima e última etapa do laço 2-6 refere-se à geração de um evento para a própria aplicação, de forma que a função “WinProcedure” seja chamada com um dos parâmetros correspondendo à estrutura de dados devidamente traduzida.

O processamento dos eventos propriamente dito é realizado pela função padrão “WinProcedure”, definida na API do Windows e apresentada na Figura 6.16. Os eventos tratados são apenas 3, dois de comunicação (“RECEBE” e “ENVIA”) e o outro para finalizar a execução (“FINALIZA”). Quando o evento “RECEBE” é ativado, a função “Processa” faz o tratamento adequado dos dados inclusos da mensagem, disparando inclusive outras funções do módulo sempre que necessário. O evento “ENVIA” denota a necessidade de transferir dados devidamente arranjados na mensagem para outra janela, tarefa esta realizada através de uma instrução definida na API do Windows que gera um evento da janela destino, o qual, por sua vez, provocará a invocação da função “WinProcedure” para o tratamento adequado da solicitação. O outro evento definido - “FINALIZA” - destina-se ao encerramento da execução do módulo, isto porque ela estará vinculada às mensagens recebidas que eventualmente responderão se o módulo continua ou não ativo.

Todos os módulos inclusos no banco de modelos do sistema de apoio à decisão, além do módulo de acesso ao banco de dados, fazem uso dessas duas funções básicas apresentadas nas Figuras 6.15 e 6.16 e, conseqüentemente, passam a ser orientados a eventos. Alguns têm um funcionamento mais simples, respondendo somente aos eventos de criação e finalização. Outros, porém, necessitam de respostas de outros módulos para completarem as suas execuções, obrigando-os a utilizar o procedimento “WinProcedure” para enviar e receber as mensagens dos módulos com os quais se comunicam, o que os bloqueia até que as respectivas respostas cheguem.

Na Figura 3.5 é ilustrado o módulo de controle, o qual centraliza a comunicação entre os três subsistemas: interface, banco de modelos e banco de dados. A tarefa do módulo de controle é coordenar a intercomunicação entre os módulos de diferentes subsistemas e disparar a execução de alguns deles sempre que necessário. Com isso, a independência entre os subsistemas e o aumento de desempenho do SAD são favorecidos pela ocorrência de vários processos concorrentes devidamente gerenciados pelo módulo de Controle.

As especificidades do funcionamento do módulo Projeto de Execução são incluídas na função “WinProcedure”, conforme apresentado na Figura 6.17.

```
int WinProcedure(mens)
1. escolha(mens)
2. {
3.   caso FINALIZA:
4.     EnviaMensCT(mens)
5.     Finaliza()
6.   caso EXECUTA CM:
7.     WinExec(“winCalculoMecanico winConstrutor”)
8.   caso RECEBE:
9.     Processa(mens)
10.    se mens.id == CM então
11.      RecebeMensCM()
12.    senão
13.      RecebeMensCT()
14.   caso ENVIA:
15.     EnviaMensCM(mens)
16.}
17. retorna(0)
```

Figura 6.17 - Função para processar as mensagens do módulo Projeto de Execução

O primeiro evento FINALIZA destina-se ao encerramento da execução do módulo, mas antes disso uma mensagem é enviada para o módulo de Controle, notificando-o desta ocorrência.

O disparo do módulo Cálculo Mecânico está associado ao evento EXECUTA CM e é realizado através de um comando definido pela API do Windows chamado “WinExec”.

O envio de mensagens para o módulo Cálculo Mecânico é realizado através do evento ENVIA, enquanto o evento RECEBE encarrega-se da recepção que pode ser proveniente tanto do módulo Cálculo Mecânico como do módulo Controle. No primeiro caso, a função “RecebeMensCM” cumpre a tarefa de receber os dados relativos ao dimensionamento mecânico dos postes, dando continuidade à execução do módulo Projeto de Execução.

As mensagens provenientes do módulo Controle têm por objetivo iniciar a execução do módulo Projeto de Execução e são processadas pela função “RecebeMensCT”.

6.5.2. Execução do sistema especialista

O módulo Projeto de Execução pode ser utilizado através da interface do protótipo do SAD para elaboração de projetos de redes de distribuição de energia elétrica ou então através de uma interface mais simples que permite a sua comunicação com o módulo Cálculo Mecânico, mas não apresenta os resultados de forma gráfica.

Após o usuário projetar o traçado e o dimensionamento de uma rede de distribuição manualmente ou invocar o módulo Proponente para tal fim, pode-se executar o módulo Projeto de Execução para obter o detalhamento dos elementos físicos da rede.

Na Figura 6.18 apresenta-se um exemplo de projeto para um bairro de Campinas utilizando o protótipo do SAD de projetos.

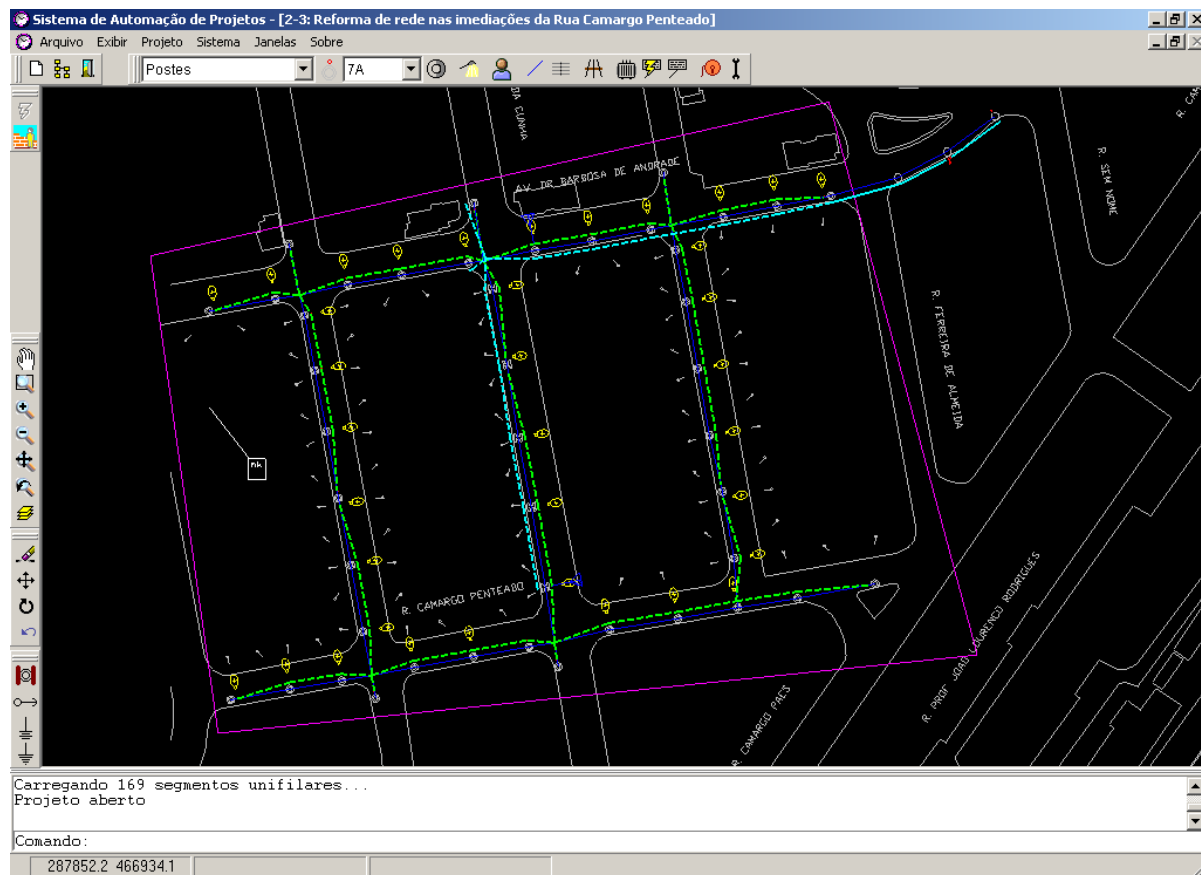


Figura 6.18 – Projeto de rede

Com o projeto definido, devem-se escolher quais os elementos físicos da rede deverão ser inferidos pelo módulo Projeto de Execução, conforme ilustra a Figura 6.19.

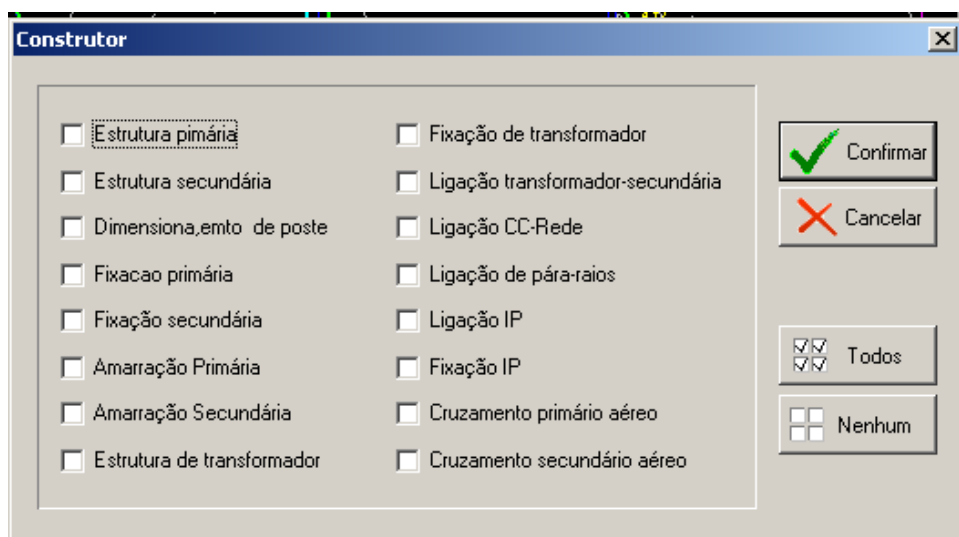


Figura 6.19 – Interface – escolha de elementos físicos

Após a execução do módulo Projeto de Execução, os elementos físicos inferidos são armazenados na base de dados e os mais relevantes são apresentados na tela.

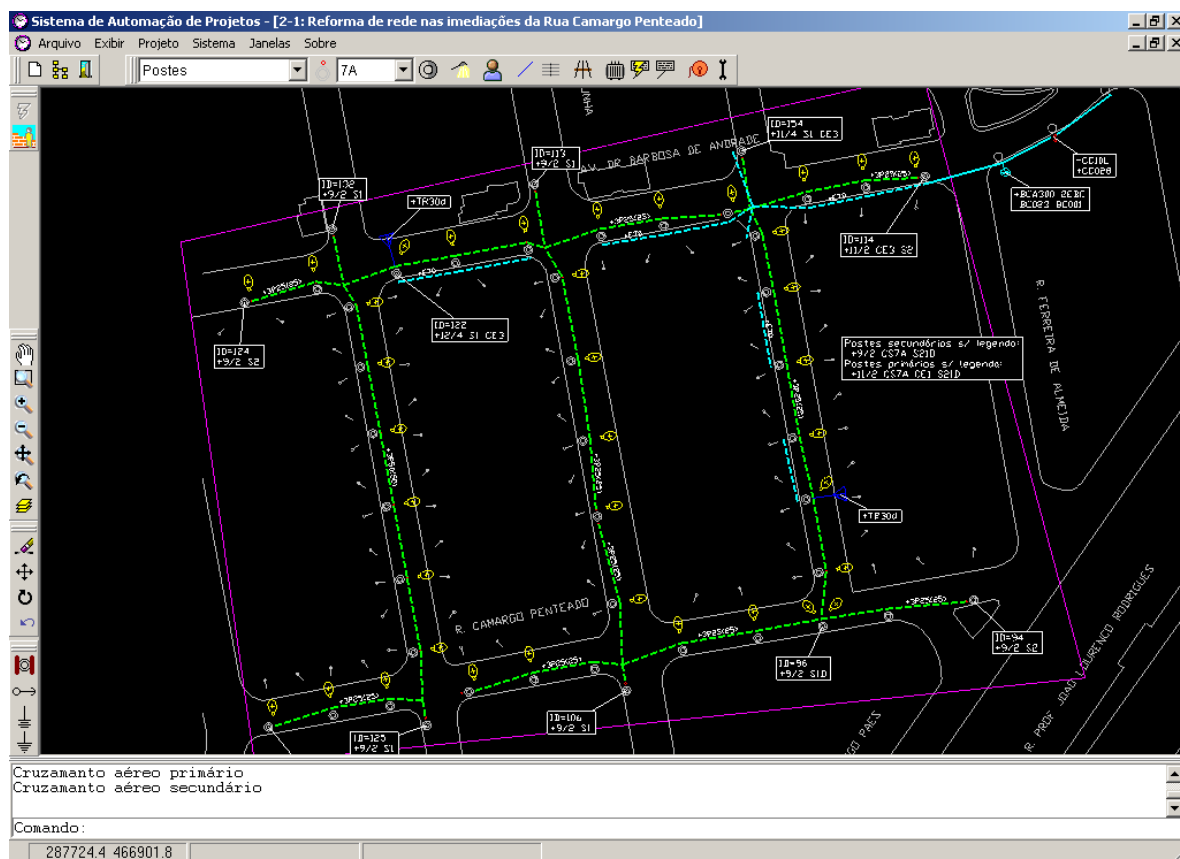


Figura 6.20 – Interface – elementos físicos inferidos

Vale ressaltar que o primeiro protótipo do SAD de projetos ainda não possui todas as funcionalidades descritas na concepção apresentada no Capítulo 3 e o objetivo aqui é apenas ilustrar uma possível forma de utilização do módulo Projeto de Execução.

6.6. Verificação e validação do sistema especialista

Durante o desenvolvimento do sistema especialista foram realizados ciclos de verificação e validação do sistema especialista. Primeiramente, a fim de isolar erros conceituais de erros de implementação, validou-se o conhecimento representado nas árvores de decisão junto ao especialista. Após esta etapa, ao longo da construção da base de conhecimento, criaram-se pequenos projetos de vários tipos a fim de validar os elementos construtivos inferidos. Os resultados foram confrontados com as normas técnicas e verificados pelo especialista. A cada

interação, os problemas existentes na base de conhecimento foram identificados e as regras corrigidas.

Abaixo são apresentados dois destes projetos de teste e os resultados obtidos pelo sistema especialista.

O projeto de teste 1 é composto de 8 postes e apenas um circuito secundário. A Figura 6.21 mostra a rede sobre a qual será usado o Módulo Projeto de Execução. A rede primária corresponde ao tracejado em azul, a secundária ao tracejado em vermelho e o transformador ao triângulo.

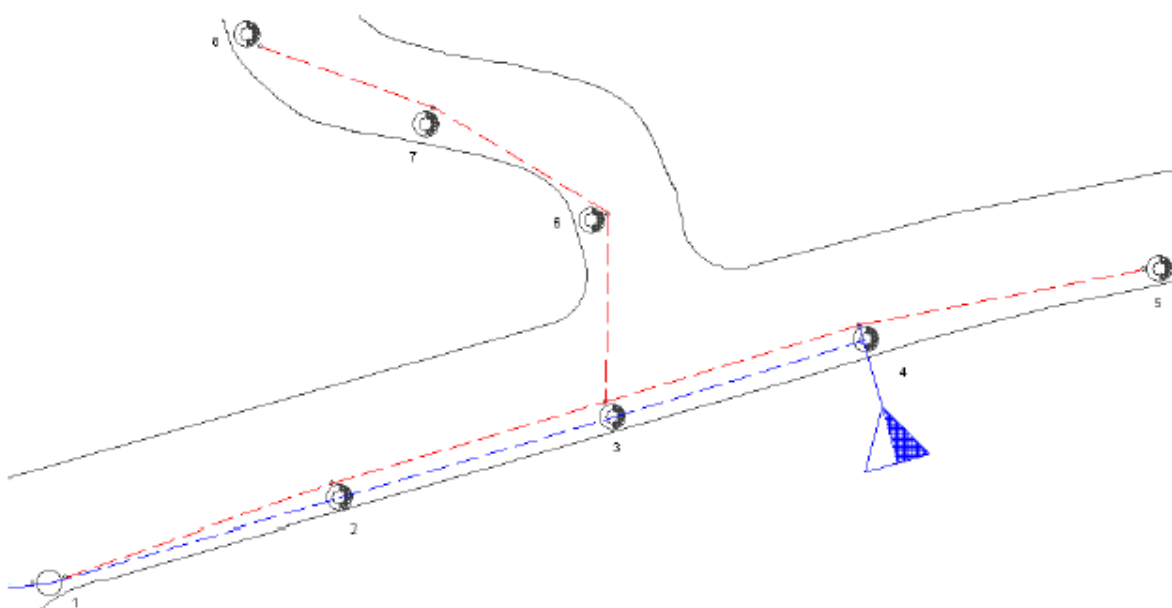


Figura 6.21 – Projeto de teste 1

As informações sobre a rede se encontram na Tabela 6.2.

Nº do poste	Cabos - primária	Ângulo - primária	Cabos - secundária	Ângulo - secundária	Qtd. condutores secundária	Ramal de ligação
1	1 x 477 (nua)	-	1 x 2/0 (nua)	-	4	sim
2	2 x 477 (nua)	7°	2 x 2/0 (nua)	7°	4	sim
3	2 x 477 (nua)	0°	3 x 2/0 (nua)	0°	4	sim
4	1 x 477 (nua)	-	2 x 2/0 (nua)	0°	4	sim
5	-	-	1 x 2/0 (nua)		2	sim
6	-	-	2 x 2/0	70°	4	sim

Nº do poste	Cabos - primária	Ângulo - primária	Cabos - secundária	Ângulo - secundária	Qtd. condutores secundária	Ramal de ligação
			(nua)			
7	-	-	2 x 2/0 (nua)	10°	4	sim
8	-	-	1 x 2/0 (nua)		4	sim

Tabela 6.2 – Informações da rede do projeto de teste 1

Após executado, o SE forneceu os seguintes resultados, mostrados na Tabela 6.3.

Nº do poste	Tipo de poste	Estrutura primária ¹	Estrutura secundária ²
1	Concreto 11/600	N3DER	S32
2	Concreto 11/200	N2	S321D
3	Concreto 11/200	N1	S321D
4	Concreto 11/400	N3	S321D
5	Concreto 9/600	-	S3
6	Concreto 9/200	-	S32 e S3
7	Concreto 9/200	-	S321D
8	Concreto 9/600	-	S32

Tabela 6.3 – Resultados inferidos para a rede do projeto de teste 1

O projeto de teste 2 é composto de 21 postes com dois circuitos secundários alimentados pelos transformadores nos postes 4 e 6. A Figura 6.22 mostra a rede, em que a rede primária corresponde ao tracejado em azul, a secundária ao tracejado em vermelho e os transformadores aos triângulos.

¹ Para verificar as situações em que estas estruturas primárias são utilizadas consulte a Tabela 4.1.

² Para verificar as situações em que estas estruturas secundárias são utilizadas consulte a Tabela 4.2.

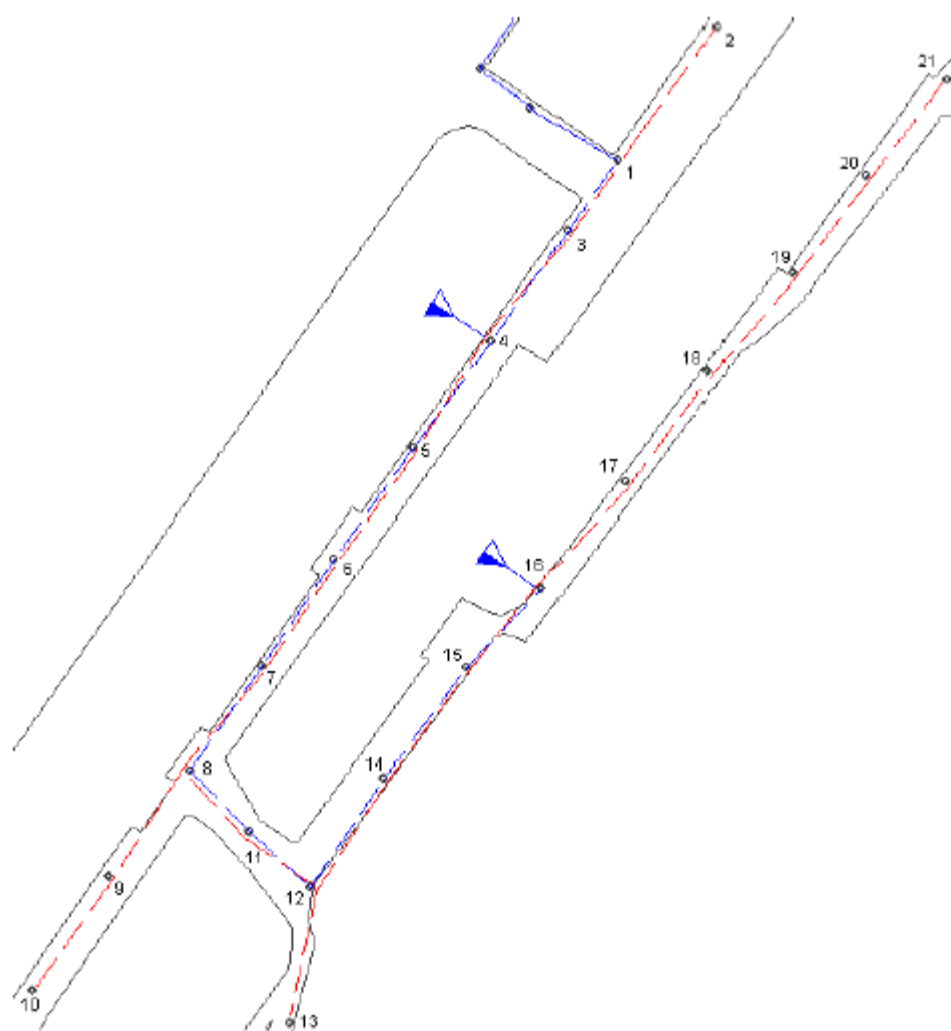


Figura 6.22 – Projeto de teste 2

As informações sobre a rede, correspondentes aos dados de entrada do SE, encontram-se na Tabela 6.4.

Nº do poste	Cabos - primária	Ângulo - primária	Cabos - secundária	Ângulo - secundária	Qtd. condutores secundária	Ramal de ligação
1	1 x 185 (compacta)	-	2 x P25 (multiplexada)	0°	-	sim
2	-	-	1 x P25 (multiplexada)	-	-	sim
3	1 x 185 (compacta)	0°	2 x P25 (multiplexada)	0°	-	sim
4	1 x 185 (compacta) e 1 x 70 (compacta)	-	2 x P25 (multiplexada)	0°	-	sim
5	2 x 70 (compacta)	0°	2 x P25 (multiplexada)	0°	-	sim
6	2 x 70 (compacta)	0°	2 x P25 (multiplexada)	0°	-	sim
7	2 x 70 (compacta)	0°	1 x P25 e 1 x P16 (multiplexada)	0°	-	sim
8	2 x 70 (compacta)	100°	2 x P16 e 1 x 25 (multiplexada)	0°	-	sim
9	-	-	2 x P16 (multiplexada)	0°	-	sim
10	-	-	1 x P16 (multiplexada)	-	-	sim
11	2 x 70 (compacta)	0°	2 x P25 (multiplexada)	0°	-	sim
12	2 x 70 (compacta)	90°	3 x P25 (multiplexada)	30°	-	sim
13	-	-	1 x P25 (multiplexada)	-	-	sim
14	2 x 70 (compacta)	0°	2 x P25 (multiplexada)	0°	-	sim
15	2 x 70 (compacta)	0°	2 x P25 (multiplexada)	0°	-	sim
16	1 x 70 (compacta)	-	1 x P25 (multiplexada)	-	-	sim
17	-	-	1 x P25 (multiplexada) e 1 x 2/0 (nua)	0°	4	sim
18	-	-	2 x 2/0 (nua)	40°	4	sim
19	-	-	2 x 2/0 (nua)	20°	4	sim
20	-	-	2 x 2/0 (nua)	0°	2	sim
21	-	-	1 x 2/0 (nua)	-	2	sim

Tabela 6.4– Informações da rede do projeto de teste 2

Os postes e estruturas inferidos pelo SE são apresentados na Tabela 6.5.

Nº do poste	Tipo de poste	Estrutura primária ³	Estrutura secundária ⁴
1	Concreto 11/600	CE3-1	S21D
2	Concreto 9/600	-	S2
3	Concreto 11/200	CE1-1	S21D
4	Concreto 11/400	CE4-1	S21D
5	Concreto 11/200	CE1-1	S21D
6	Concreto 11/200	CE1-1	S21D
7	Concreto 11/200	CE1-1	S21D
8	Concreto 11/600	CE3CE3-1	S21D
9	Concreto 9/200	-	S21D
10	Concreto 9/600	-	S2
11	Concreto 11/200	CE1-1	S21D
12	Concreto 11/600	CE3CE3-1	S21D
13	Concreto 9/600	-	S2
14	Concreto 11/200	CE3-1	S21D
15	Concreto 11/200	CE1-1	S21D
16	Concreto 11/400	CE3-1	S21D
17	Concreto 9/200	-	S2 e S22
18	Concreto 9/200	-	S31D
19	Concreto 9/200	-	S31D
20	Concreto 9/200	-	S21D
21	Concreto 9/600	-	S3

Tabela 6.5 – Resultados inferidos para a rede do projeto de teste 2

O módulo Projeto de Execução (sistema especialista) também foi validado em relação à performance de sua utilização integrada ao SAD. No Capítulo 7 são apresentados estudos de caso, mostrando a utilização do SAD em diversos tipos de projetos.

³ Para verificar as situações em que estas estruturas primárias são utilizadas consulte a Tabela 4.1.

⁴ Para verificar as situações em que estas estruturas secundárias são utilizadas consulte a Tabela 4.2.

Capítulo 7 - Estudos de Caso

7.1. Introdução

O funcionamento do módulo Projeto de Execução do SAD para elaboração de projetos de redes aéreas de distribuição de energia elétrica é ilustrado considerando cinco estudos de caso com características particulares, abrangendo os vários tipos de projetos solicitados ao projetista. Para cada um dos casos também é apresentado o projeto elétrico feito pelo projetista ou com o auxílio do módulo Proponente, do qual são obtidos os dados de entrada necessários pelo módulo Projeto de Execução.

Os casos considerados são:

- Caso 1 - Projeto de Ligação de Consumidores: projeto simples de ligação de poucos clientes à rede secundária;
- Caso 2 - Projeto de Pequeno Núcleo Habitacional: interligação à rede de distribuição de um pequeno conjunto de consumidores;
- Caso 3 - Projeto de Novo Núcleo Habitacional: interligação de um grande conjunto de consumidores;
- Caso 4 - Projeto de Expansão: pequena expansão da rede existente para a interligação de algumas cargas;
- Caso 5 - Projeto de Melhoramento: considera-se que um aumento significativo na demanda de um conjunto de consumidores implica necessariamente em alterações na rede existente.

As seções a seguir apresentam cada um destes projetos.

7.2. Caso 1 – Projeto de Ligação de Consumidores

A Figura 7.1 ilustra uma situação em que alguns clientes de baixa tensão e demanda relativamente baixa solicitam atendimento à concessionária de energia elétrica. Os clientes se encontram distribuídos nos pontos B, C e D, sendo que a fronteira com a rede existente é o poste A.

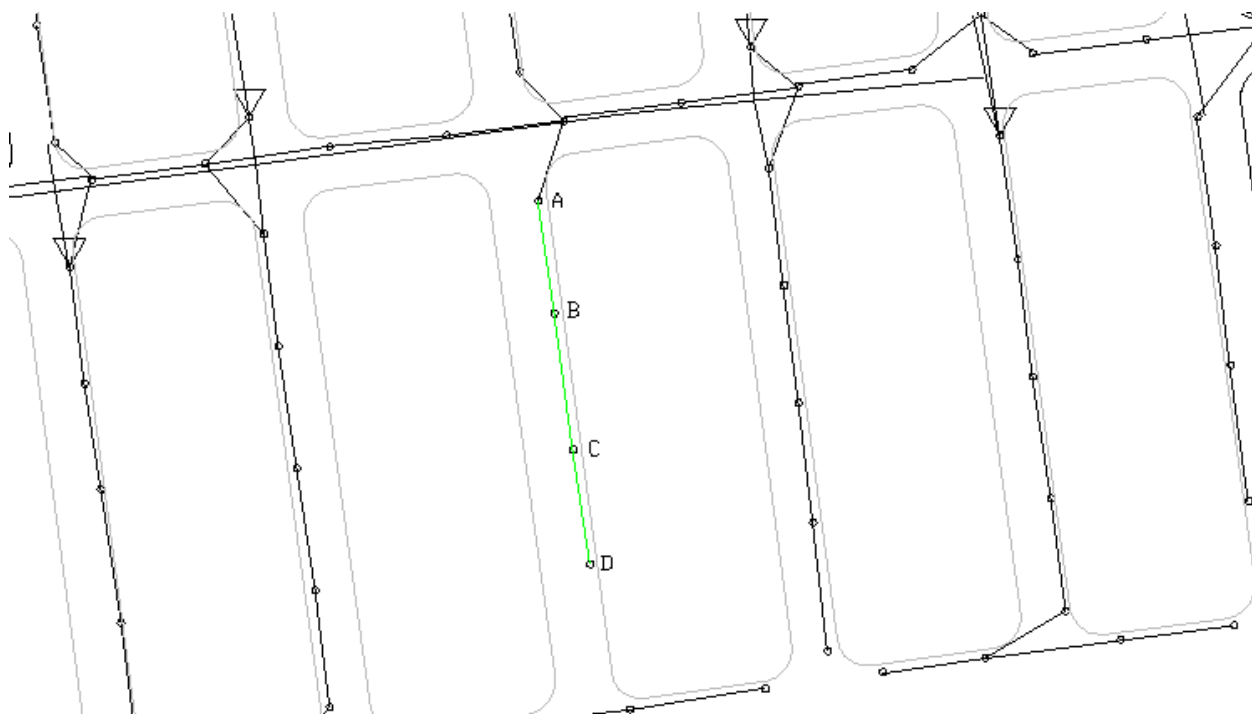


Figura 7.1 - Estudo de Caso 1: Ligação de Consumidores

Por tratar-se de um projeto de pequena complexidade, é comum o projetista (usuário do sistema) propor os condutores e postes a serem instalados. Contudo, nada impede que se utilize o módulo Proponente do SAD para fazer o projeto elétrico.

Aqui, considera-se que o projetista decidiu não usar o Proponente e concluiu não ser necessária nenhuma alteração da rede primária ou inserção de transformador para atender às novas cargas. Ele faz manualmente o traçado da nova rede secundária (em verde na figura), selecionando o condutor a ser utilizado e os pontos em que os postes serão instalados (no caso, pontos B, C e D).

Após a finalização do projeto elétrico, o projetista aciona o módulo Projeto de Execução para determinar os elementos construtivos da rede.

O módulo Projeto de Execução aciona o módulo Cálculo Mecânico para efetuar o dimensionamento dos postes. Na Tabela 7.1 se encontram os elementos construtivos Poste e Estrutura Secundária inferidos pelo módulo.

Poste	Tipo de poste	Estrutura Secundária ⁵
A	Poste de concreto 9/200	S2
B	Poste de concreto 9/200	S21D
C	Poste de concreto 9/200	S21D
D	Poste de concreto 9/400	S2

Tabela 7.1 – Elementos inferidos pelo módulo Projeto de Execução para o Caso 1

Além destes elementos foram inferidas as seguintes quantidades de fixações das estruturas secundárias e a amarração dos cabos (Tabela 7.2):

Elemento	Quantidade
Fixação de estrutura secundária	5
Amarração de cabo secundário	8

Tabela 7.2 – Quantidade de fixações e amarrações inferidas pelo módulo Projeto de Execução para o Caso 1

Para o poste D o sistema especialista infere uma estrutura secundária S2 por tratar-se de uma rede multiplexada em situação fim de linha e existir no poste ramal de ligação. Já para os postes B e C a estrutura é a S21D, apropriada para rede multiplexada em situação passante, com ângulo formado entre os condutores menor igual a 45° e presença de ramal de ligação, como pode ser observado na árvore de decisão da Figura 7.2.

⁵ Para verificar as situações em que estas estruturas secundárias são utilizadas consulte a Tabela 4.2.

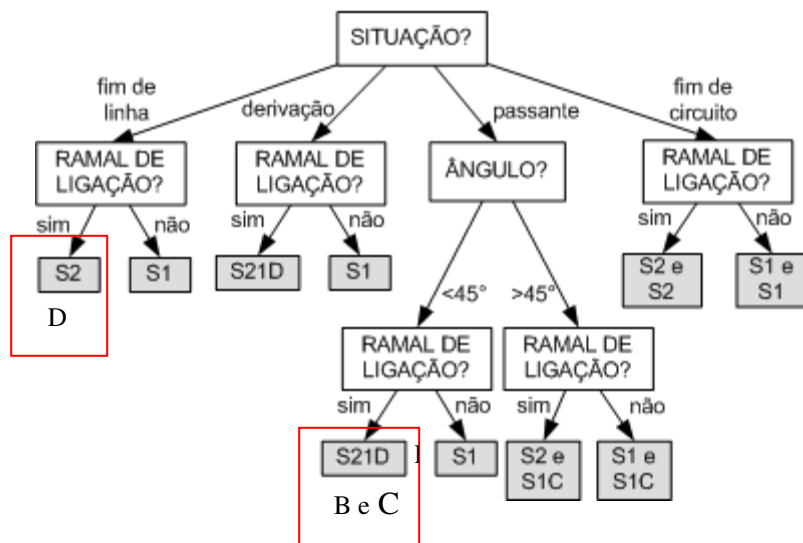


Figura 7.2 – Árvore de decisão para redes secundárias multiplexadas novas

No poste A, fronteira com a rede existente, foi inferida uma estrutura S2. Esta inferência se deve ao fato de o novo condutor ser do tipo multiplexado e estar em situação passante com o condutor previamente existente e da presença de ramal de ligação, como pode ser observado na Figura 7.3.

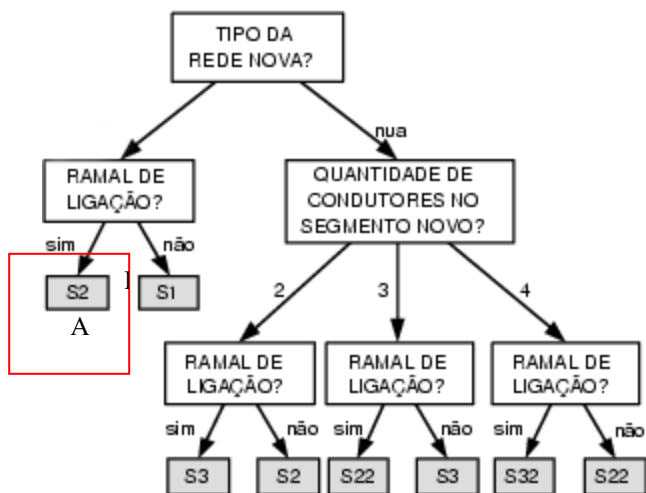


Figura 7.3 – Árvore de decisão para redes secundárias existentes

7.3. Caso 2 – Projeto de Pequeno Núcleo Habitacional

A Figura 7.4 mostra um pequeno núcleo habitacional, composto por 45 pontos de consumo (cada ponto equivale a um poste). O ponto A marca a fronteira com a rede existente.

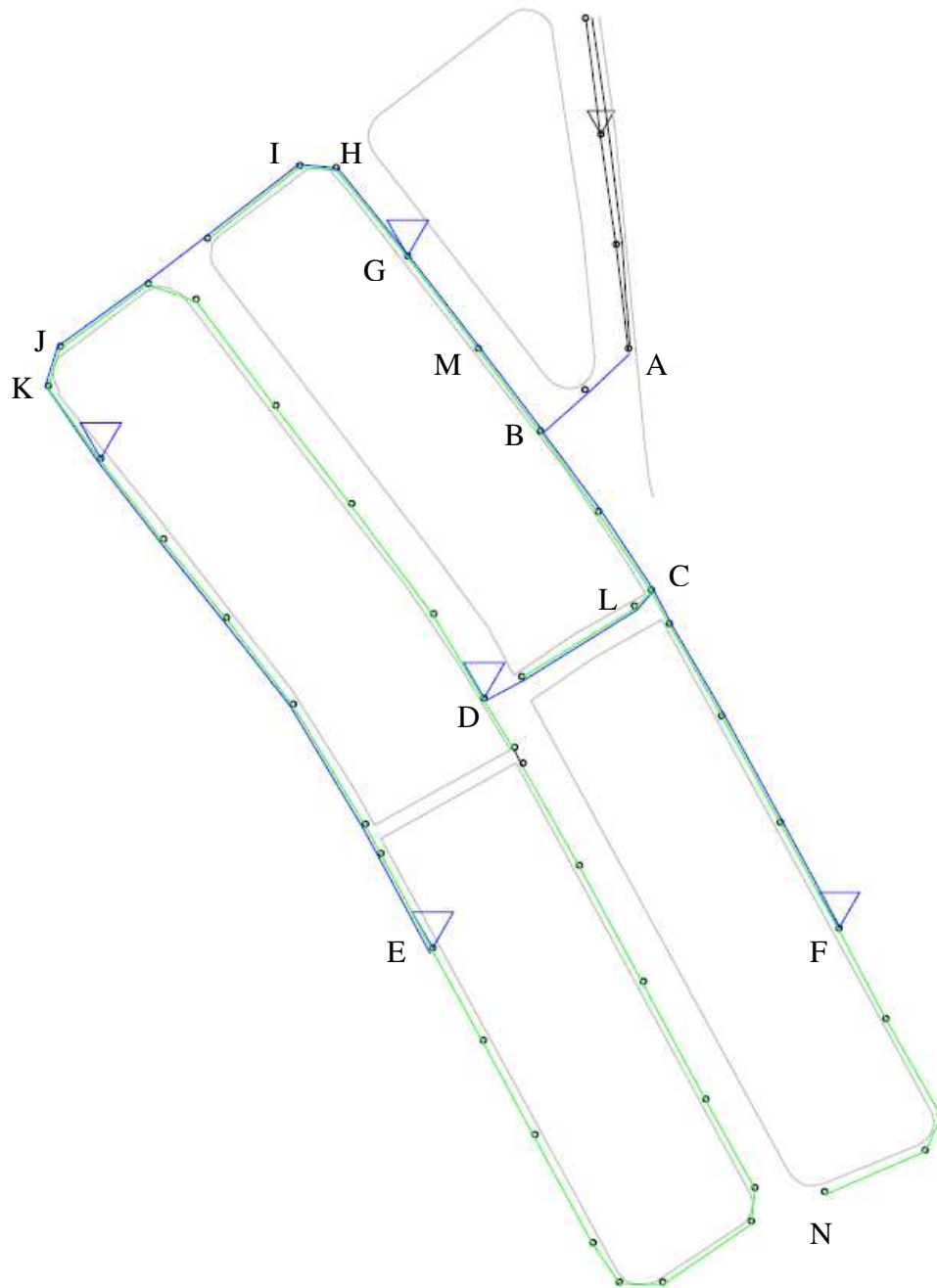


Figura 7.4 - Estudo de Caso 2: Atendimento a pequeno núcleo habitacional

Neste exemplo, o projetista elabora o projeto elétrico sem auxílio do módulo Proponente. Ele determina o traçado, a extensão e o dimensionamento de todos os condutores da rede primária e secundária. O módulo Cálculo Elétrico é executado para conferir os limites de fluxo nos condutores e queda de tensão nas barras.

A rede primária proposta pelo projetista tem o traçado marcado em azul; a rede secundária proposta está ilustrada com a cor verde. Foram propostos cinco novos transformadores (triângulos em azul), como se observa na figura. O arquivo de entrada para o módulo Projeto de Execução contém as informações dos condutores e transformadores.

O projetista deve então executar o módulo Projeto de Execução, que irá fazer o projeto construtivo da rede. A quantidade de elementos de rede propostos por este módulo se encontra na Tabela 7.3.

Elemento	Quantidade
Poste	3 postes 12/400; 2 postes 11/1000; 2 postes 11/600; 3 postes 11/400; 16 postes 11/200 e 20 postes 9/200
Estrutura Primária	1 CE3N3; 2 CE3SHN3; 14 CE1; 1 CE2; 3 CE3 e 5 CE4
Fixação de estrutura primária	27
Amarração de cabo primário	15
Estrutura Secundária	30 S21D; 14 S2; 4S1C
Fixação de estrutura secundária	48
Amarração de cabo secundário	112
Transformador	5
Estrutura do transformador	5
Fixação de transformador	5

Tabela 7.3 – Quantidades dos elementos inferidos no Caso 2

Analisando os resultados obtidos pelo módulo Projeto de Execução pode-se constatar que o sistema especialista realiza as inferências a partir dos dados do projeto elétrico, determinando os elementos construtivos da rede. Para os pontos de passagem da rede primária foram definidos postes mais altos (de 11 e 12 metros), obedecendo às normas técnicas.

Nos postes que fazem parte do traçado da rede primária percebe-se uma maior quantidade de estruturas do tipo CE1, utilizada em todos os postes em que a rede é do tipo compacta, os condutores estão na situação passante e formam ângulo menor que 6° como, por exemplo, no ponto M da Figura 7.4. A estrutura CE3N3 é definida para o poste do ponto A que marca a transição entre a rede nua existente e a rede compacta proposta. A estrutura CE3SHN3 é definida para os dois postes em que ocorre derivação compacta-compacta (B e C na Figura 7.4). A estrutura CE3 está presente nos postes D, E e F da Figura 7.4 que se encontram em situação de fim de linha. A estrutura CE4 está presente nos poste G em que existe uma mudança de bitola do condutor de E18 para E70 e nos postes H, I, J e K da Figura 7.4 que se encontram em situação passante com ângulo entre os condutores maior que 30° e menor que 60° . A estrutura CE2 é utilizada no postes L da Figura 7.4, cujos condutores estão na situação passante com ângulo entre os condutores maior que 6° e menor que 30° .

Nos postes que fazem parte do traçado da rede secundária há predominância da estrutura secundária S21D, utilizada para rede multiplexada com ângulo entre os condutores menor que 45° e existência de ramal de ligação (por exemplo no ponto M da Figura 7.14) e também nas derivações (por exemplo, no ponto C). Para passante com ângulo maior que 45° utiliza-se uma estrutura S2 e outra S1C (por exemplo, ponto H). A estrutura S2 também pode ser utilizada em fins de linha, como no ponto N.

Com a análise destes resultados pode-se observar que o sistema especialista consegue perceber as diferentes situações de projeto, levando em consideração o tipo da rede, os condutores utilizadas, ângulo entre os condutores, dentre outras características.

Os estudos de caso 1 e 2 mostram como o SAD pode ser utilizado como uma ferramenta de auxílio ao projetista. Ao não utilizar o módulo Proponente, o projetista deve propor o projeto elétrico da rede. Para casos pequenos, talvez esse seja o procedimento usual a se adotar, apesar de nada impedir que o projetista faça o projeto todo pelo SAD.

No Caso 2 apresentado, é discutível a vantagem de se descartar o auxílio do módulo Proponente, pois ele não faz apenas proposta de projeto elétrico; ele propõe um projeto otimizado, com custos e tempo bastante reduzidos (como será mostrado nos próximos casos).

Além do mais, sua saída é apenas uma proposta, ela pode ser alterada pelo projetista sempre que for conveniente, antes de iniciar o projeto de execução.

7.4. Caso 3 – Projeto de Novo Núcleo Habitacional

Nesta seção é apresentado o estudo correspondente ao projeto de um novo núcleo habitacional como mostrado na Figura 7.5.

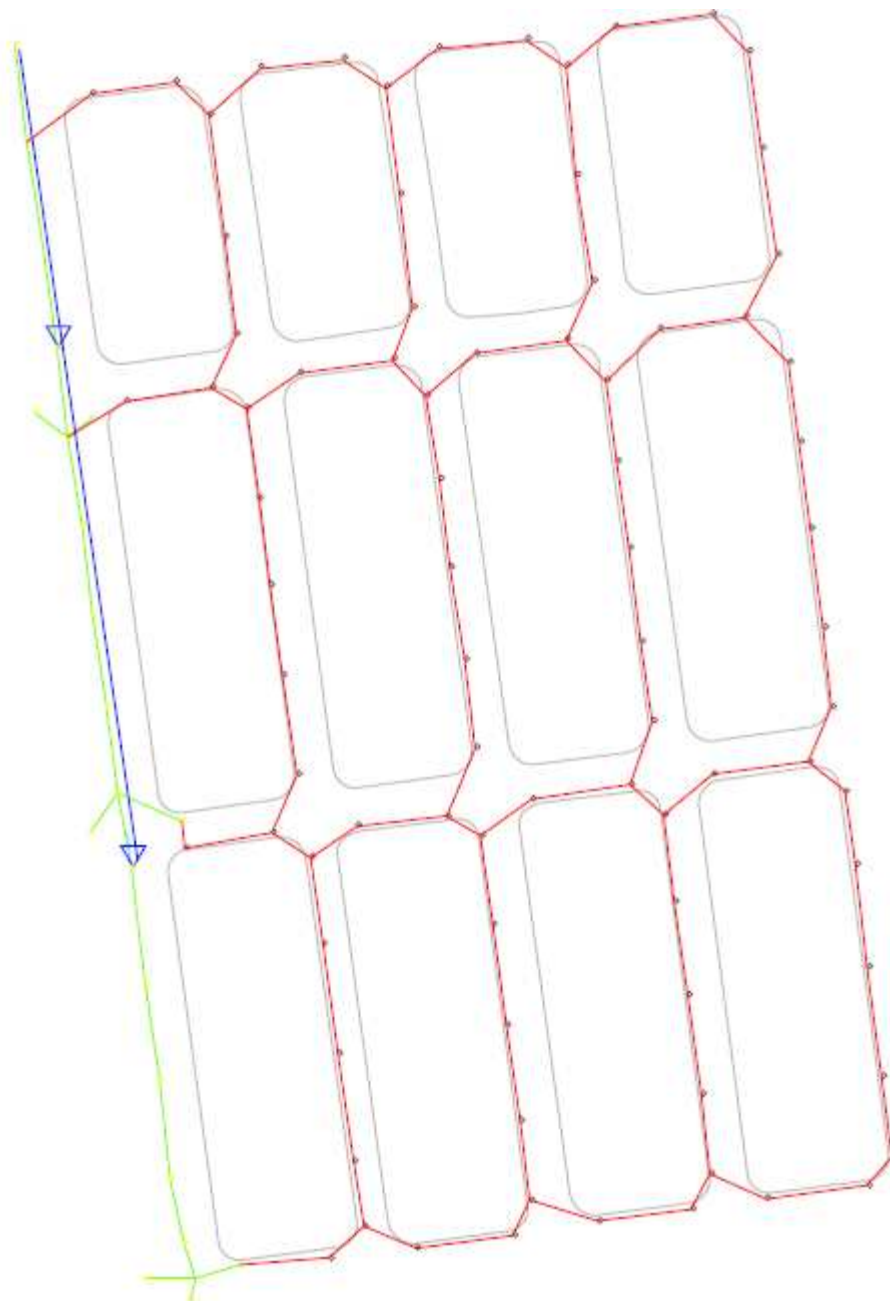


Figura 7.5 - Estudo de Caso 3: Atendimento a novo núcleo habitacional

Os círculos na cor preta na figura definem os pontos onde podem ser instalados postes ou *flying-taps* e os traços vermelhos definem os arcos ou vãos pelos quais podem ser lançados cabos.

Observa-se que à esquerda tem rede existente com dois transformadores (triângulo azul), rede primária (azul) e rede secundária (verde). Para realizar a proposta de projeto elétrico foi utilizado o Módulo Proponente.

A instância que representa o núcleo habitacional a ser projetado possui 83 nós e 116 arcos e devem ser atendidos 83 novos consumidores com consumo estimado de 300 kWh cada um. Ao Módulo Proponente lhe é permitido modificar a rede existente (trocar cabos, modificar posição ou capacidade de transformadores existentes, modificar circuitos secundários) para melhor atender os novos consumidores a custo mínimo.

Com os dados do projeto e aplicando o algoritmo de otimização do módulo Proponente desenvolvido por Costa et. al (2004) e refinado por Garcia et. al (2004) obtém-se a solução de rede elétrica apresentada na Figura 7.6. Os arcos de cor verde correspondem à nova rede secundária, enquanto os arcos de cor azul correspondem à ligação dos transformadores à rede primária existente.

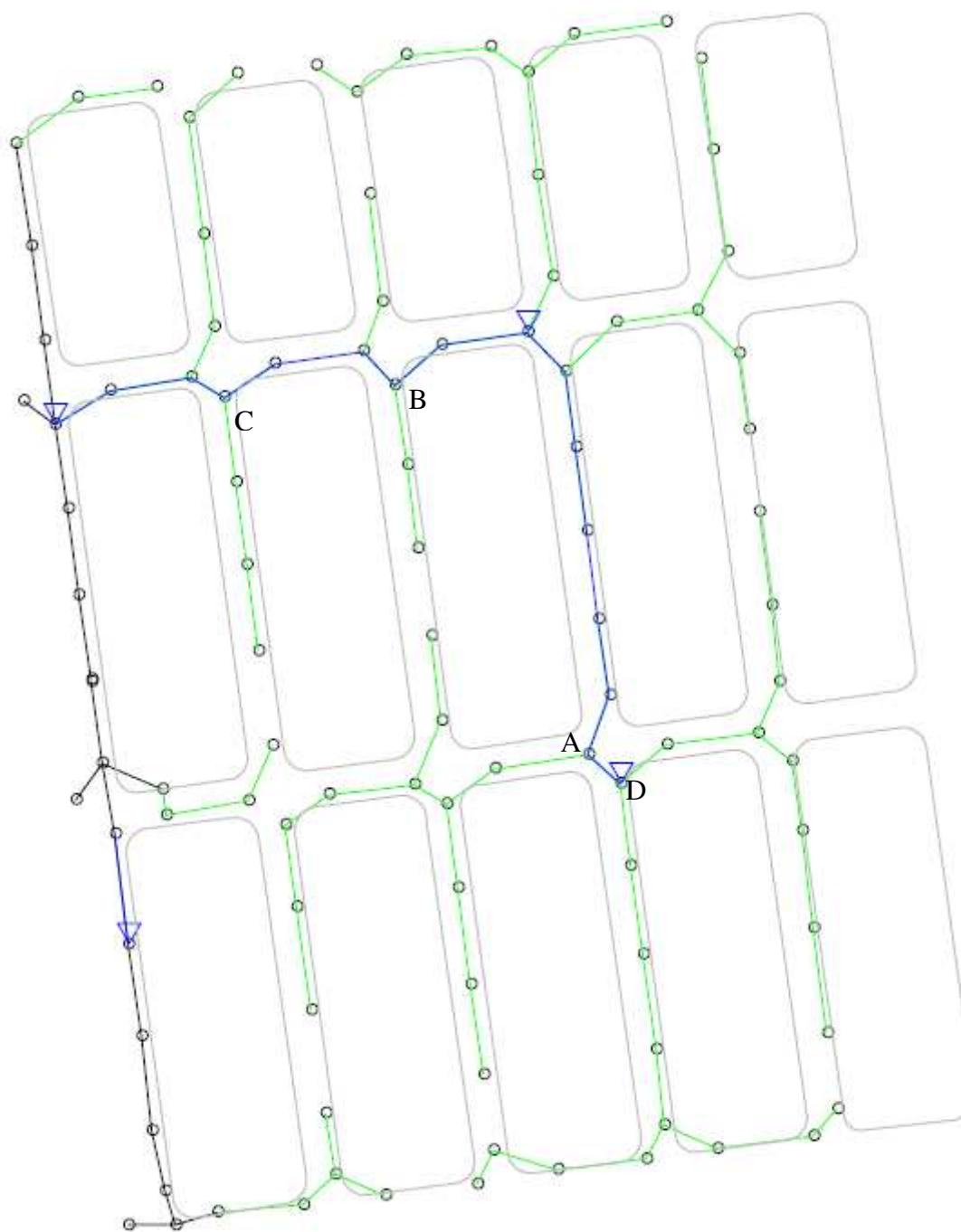


Figura 7.6 – Rede proposta para o novo núcleo habitacional

Observa-se na Figura 7.6 que o novo projeto prevê 4 transformadores (três de 45 e um de 75 kVA), sendo que os dois transformadores existentes foram mudados de posição e capacidade

para atender os novos circuitos secundários. As Figuras 7.7 e 7.8 mostram separadamente a rede primária proposta e os circuitos secundários propostos.

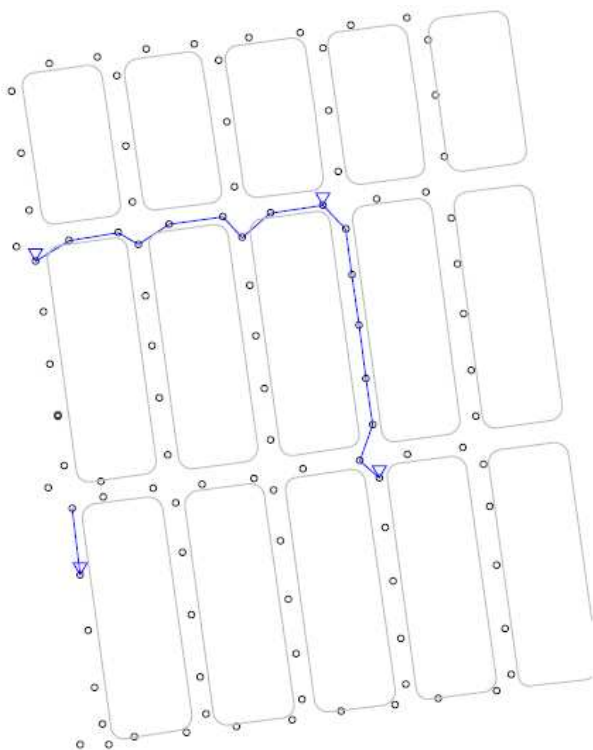


Figura 7.7 – Rede primária da solução proposta para núcleo habitacional

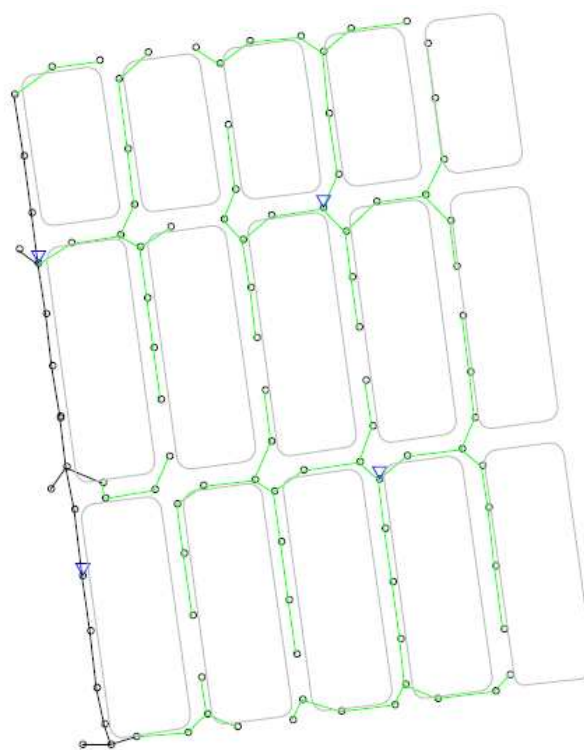


Figura 7.8 – Rede secundária proposta para núcleo habitacional

Os valores aproximados em R\$ da solução proposta são apresentados na Tabela 7.4. O custo fixo representa a soma dos custos de transformadores, postes, cabos e *flying-taps* usados na solução, o custo variável é o custo das perdas elétricas nos circuitos secundários. Todos os valores estão anualizados para um horizonte de 5 anos.

Custo	Solução (R\$)
Fixo	64.047,00
Variável	5.423,00
Total	69.470,00

Tabela 7.4 – Custo da solução obtida pelo Proponente para o Caso 3

Após a execução do módulo Proponente, executa-se o módulo Projeto de Execução que acrescenta os elementos apresentados na Tabela 7.5.

Elemento	Quantidade
Poste	1 poste 12/600; 2 postes 12/400; 3 postes 11/600; 8 postes 11/400; 4 postes 11/200; 3 postes 9/400 e 68 postes 9/200
Estrutura Primária	3 CE3CE3; 3 CE1; 3 CE2; 4 CE3 e 5 CE4
Fixação de estrutura primária	21
Amarração de cabo primário	20
Estrutura Secundária	30 S2; 6 S1C; 13 S21C e 56 S21D
Fixação de estrutura secundária	108
Amarração de cabo secundário	109
Transformador	4
Estrutura do transformador	4
Fixação de transformador	4

Tabela 7.5 – Quantidades dos elementos inferidos no Caso 3

Observe que entre as estruturas inferidas pelo sistema especialista aparece a estrutura primária CE3CE3, que não foi definida no Caso 2. Esta estrutura é utilizada em redes compactas na situação passante com ângulo formado entre os condutores superior a 60°, como pode ser visto nos pontos A, B e C da Figura 7.6.

No caso das estruturas secundárias, para as derivações pode-se verificar a corretude das inferências feitas pelo SE. Por exemplo, para o poste C foi inferida a estrutura S21D; enquanto que para o poste D foi inferido o conjunto S21C e S2. Esta diferença está no fato de no poste C os três condutores serem iguais e possuírem um ângulo inferior a 45°, enquanto que no poste D existe um condutor diferente dos demais.

7.5. Caso 4 – Projeto de Expansão

Nesta seção é apresentado um estudo de expansão de circuitos secundários para atender novos consumidores numa área adjacente. A Figura 7.9 mostra a rede existente e os novos pontos com consumidores que deverão ser atendidos (pontos unidos pelas linhas em vermelho).

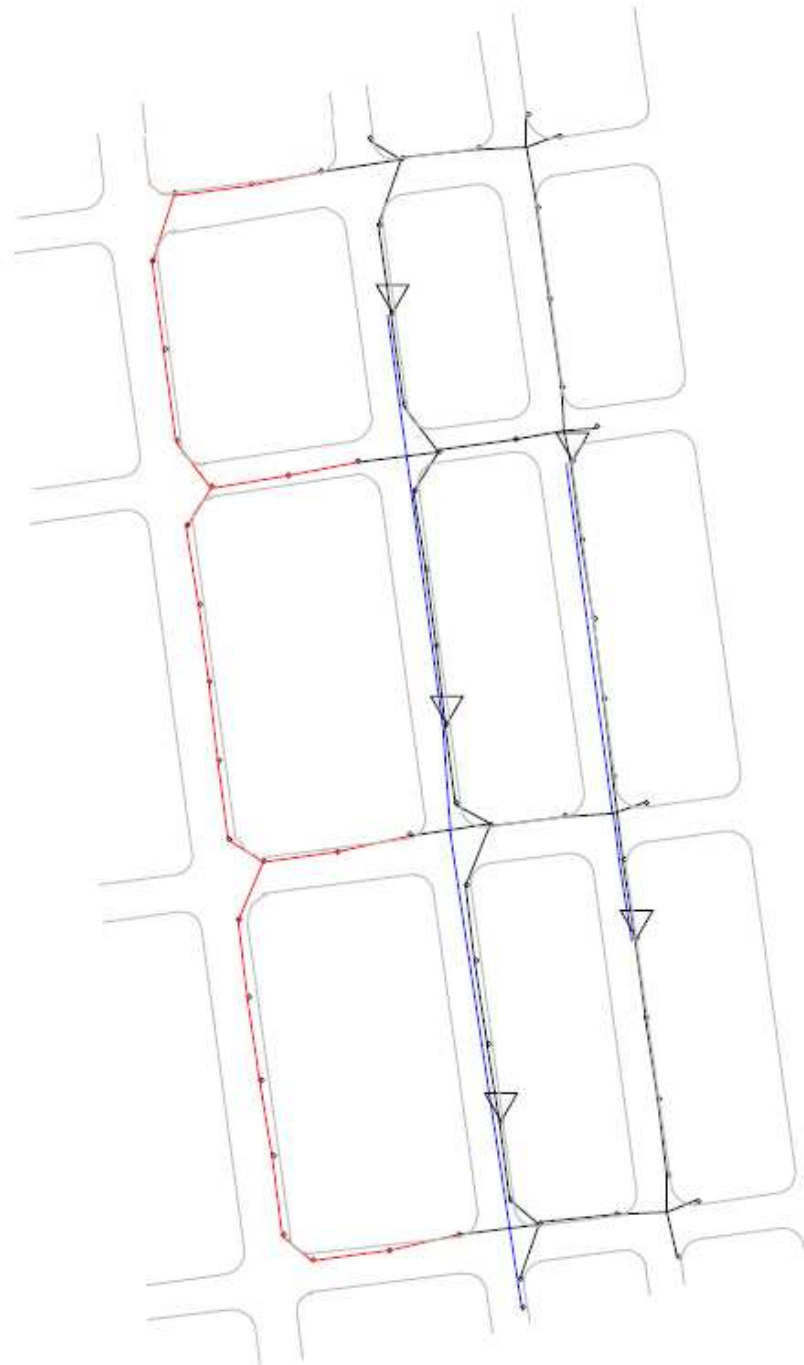


Figura 7.9 – Rede existente com novos pontos de consumo a ser atendidos

A rede secundária existente é representada pelos arcos de cor cinza escuro, os transformadores pelos triângulos da mesma cor e a rede primária existente é representada pelos arcos em azul. A nova região a ser atendida soma 21 novos consumidores, totalizando 10.500 kWh.

Para encontrar uma proposta de projeto elétrico de forma a atender as novas cargas foi utilizado o módulo Proponente. Como entrada do Proponente foram fixadas as posições dos transformadores existentes com o objetivo de minimizar as mudanças na topologia dos circuitos secundários. O intuito é apenas estender os circuitos existentes e/ou criar novos na solução devolvida pelo proponente. A Figura 7.10 mostra esta solução para o projeto considerado.

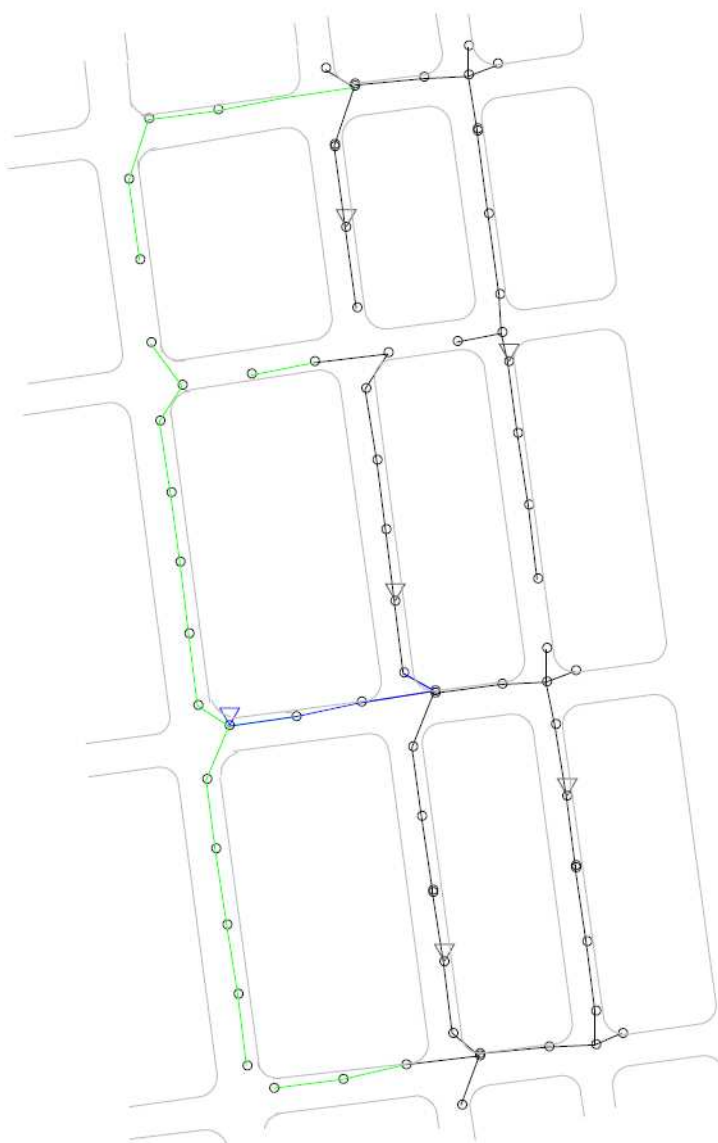


Figura 7.10 – Solução proposta para a expansão da rede

Nas Figuras 7.11 e 7.12 são apresentadas separadamente as redes primárias e secundárias da expansão. Observa-se que os três circuitos secundários existentes passaram a atender parte dos consumidores utilizando os mesmos transformadores, enquanto os outros dois circuitos ficaram idênticos.

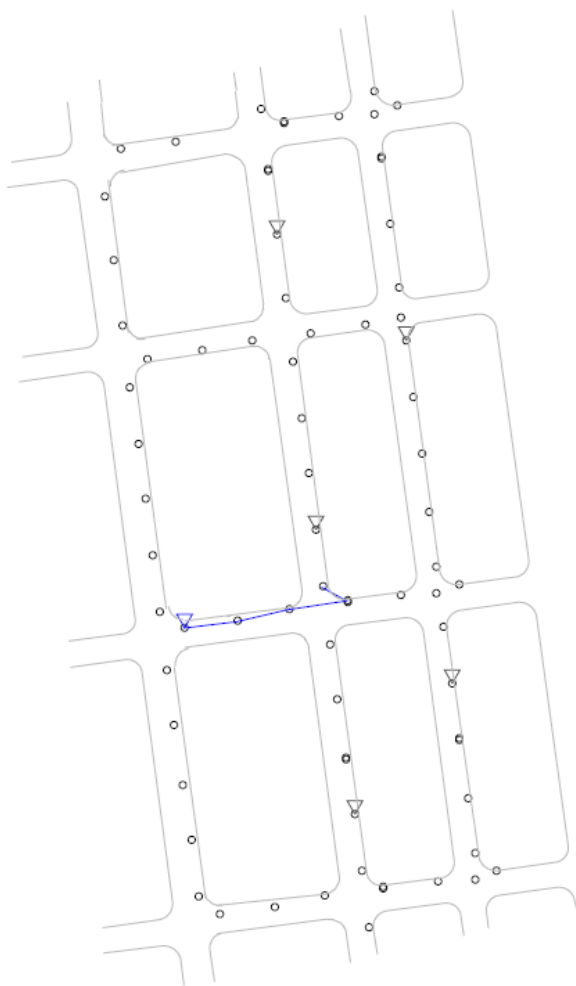


Figura 7.11 – Rede primária da solução proposta para a expansão da rede

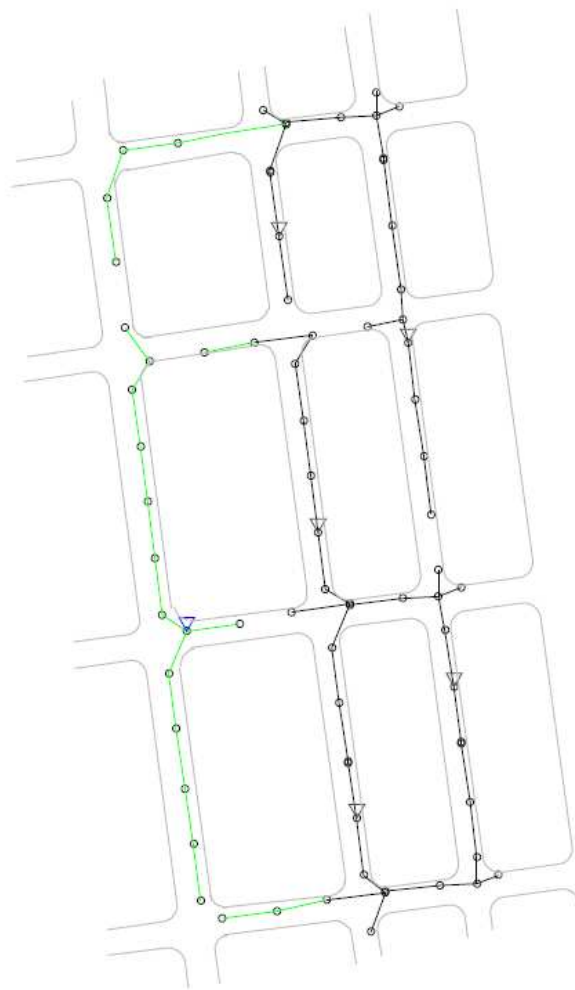


Figura 7.12 – Rede secundária proposta para a expansão da rede

Outro circuito secundário foi criado para atender o restante das cargas com um transformador de 45 kVA.

A Tabela 7.6 apresenta os custos aproximados em R\$ da rede obtida como resultado do estudo. Pode-se notar que nos circuitos secundários foram reaproveitados os cabos existentes, pois o proponente só troca os cabos existentes caso eles não suportem os fluxos decorrentes do novo traçado.

Custo	Solução (R\$)
Fixo	18.961,00
Variável	5.659,00
Total	24.620,00

Tabela 7.6 – Custo da solução obtida pelo proponente para o Caso 4

Após a execução do módulo Proponente, executa-se o módulo Projeto de Execução que acrescenta os elementos de rede mostrados na Tabela 7.7.

Elemento	Quantidade
Poste	2 postes 12/400; 4 postes 11/1000; 1 poste 11/600; 1 poste 11/400; 2 postes 11/200; 1 poste 9/600; 2 postes 9/400 e 20 postes 9/200
Estrutura Primária	3 CE3CE3; 2 CE1; 4 CE3; 2 CE4
Fixação de estrutura primária	12
Amarração de cabo primário	12
Estrutura Secundária	17 S21D; 9 S2; 2 S21C e 3 S1C
Fixação de estrutura secundária	33
Amarração de cabo secundário	33
Transformador	3
Estrutura do transformador	3
Fixação de transformador	3

Tabela 7.7 – Quantidades dos elementos inferidos no Caso 4

Neste caso podemos observar que o sistema especialista inferiu diversos tipos de estruturas primárias e secundárias, considerando as características do arruamento e dos condutores. Abaixo são apresentadas as árvores de decisão com os respectivos caminhos percorridos para obter estas soluções.

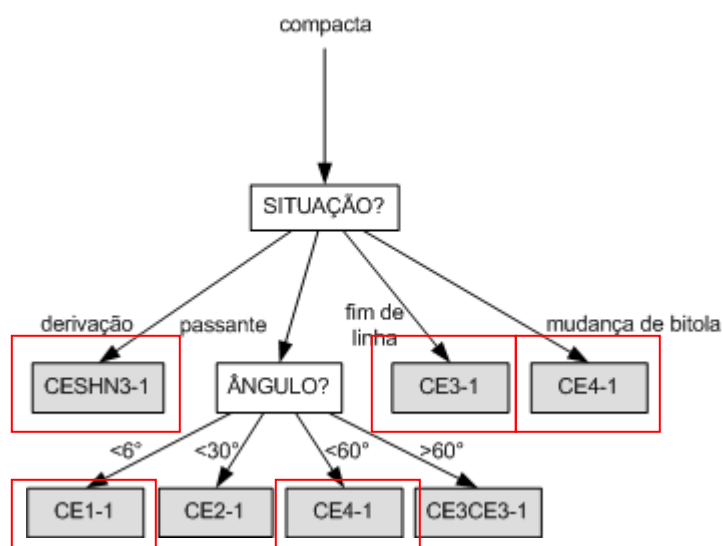


Figura 7.13 – Árvore de decisão para estrutura primária em rede primária compacta

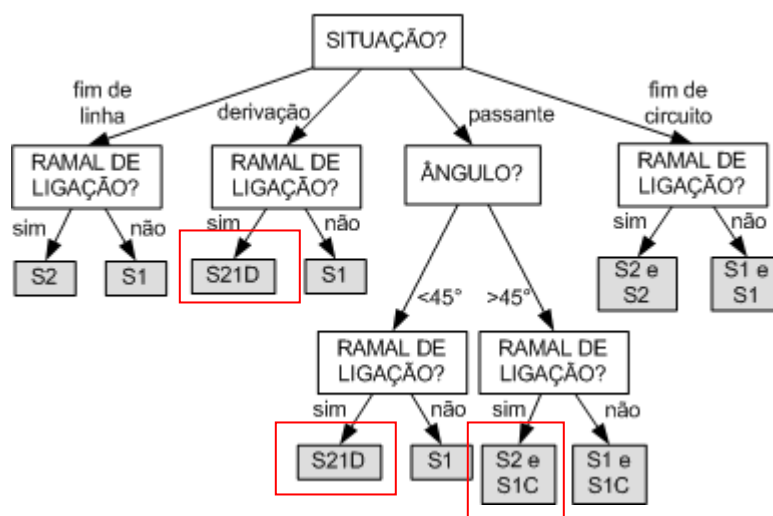


Figura 7.14 – Árvore de decisão para estrutura secundária rede secundária multiplexada

7.6. Caso 5 – Projeto de Melhoramento

O estudo de caso de melhoria de rede apresentado nesta seção é produto da simulação de um aumento de carga numa certa região. A Figura 7.15 mostra a rede existente e o lugar onde é simulado um aumento de 2400 kWh no consumo (seta vermelha).

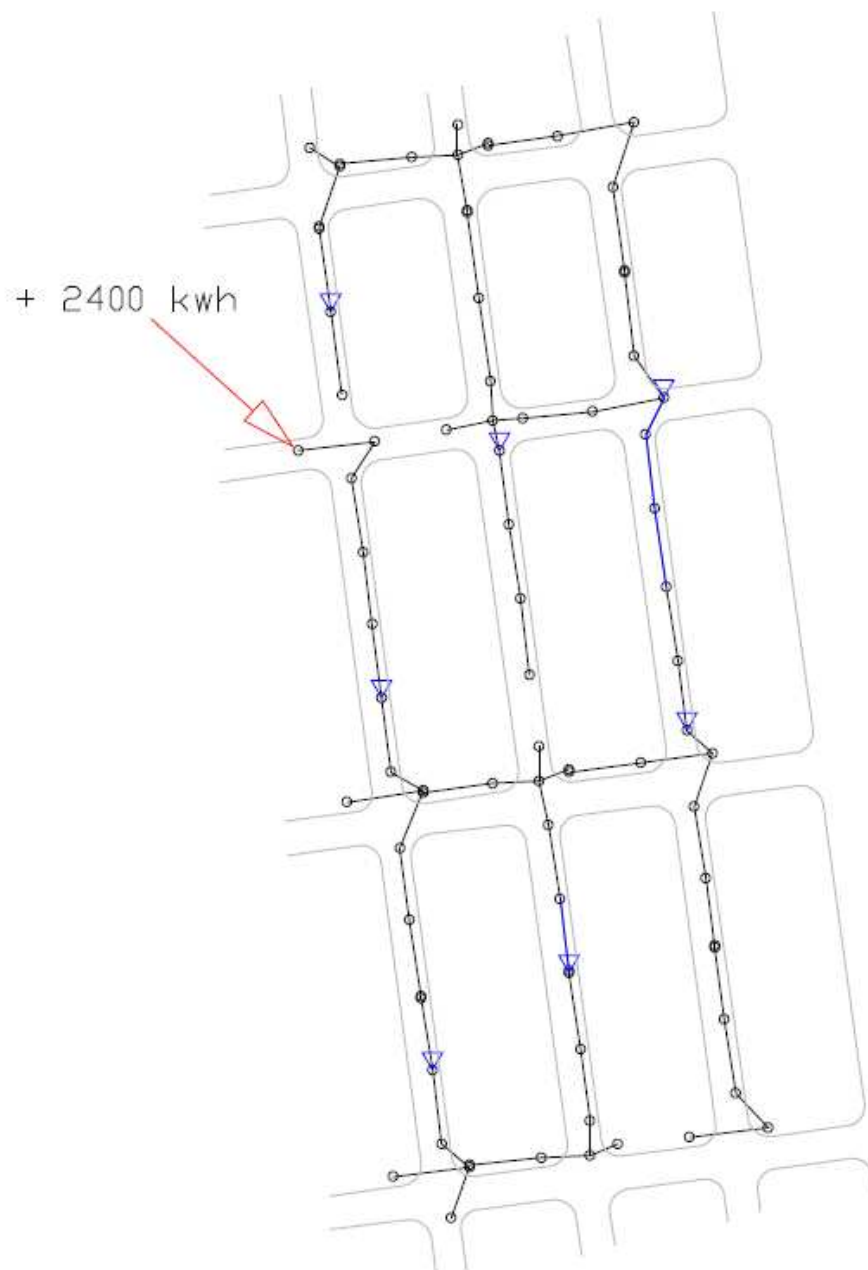


Figura 7.15 – Rede existente com aumento de consumo

A rede existente possui 7 circuitos secundários, todos com transformadores de 45 kVA. O estudo pretende contemplar uma situação na qual é necessário um melhoramento na rede de distribuição para atender a nova demanda. Com a ajuda do Proponente, foram criadas duas situações: na primeira são fixadas as posições dos transformadores com o objetivo de fazer com que o proponente crie uma solução mais próxima possível da solução existente (é esperado que o transformador do circuito em que houve o aumento de carga seja substituído por outro de maior capacidade); na segunda situação é permitido que o proponente modifique o circuito onde houve mudança de carga, por exemplo dividindo o circuito em dois. Outras situações poderiam ser simuladas, como a liberação de consumidores de circuitos adjacentes para serem realocados em outros circuitos. No entanto, as duas situações mencionadas foram escolhidas porque proporcionam a mínima intervenção na rede existente.

A Figura 7.16 apresenta a solução obtida para a primeira situação considerada (foram fixadas as posições de todos os transformadores - os circuitos permanecem os mesmos). Observa-se que o módulo proponente sugeriu a mudança do transformador de 45 para 75 kVA, de forma a atender o aumento na demanda do circuito. Os elementos adicionados pelo módulo Projeto de Execução para esse caso são apenas um transformador, uma estrutura para transformador e a fixação do transformador (em decorrência da mudança de localização do transformador).

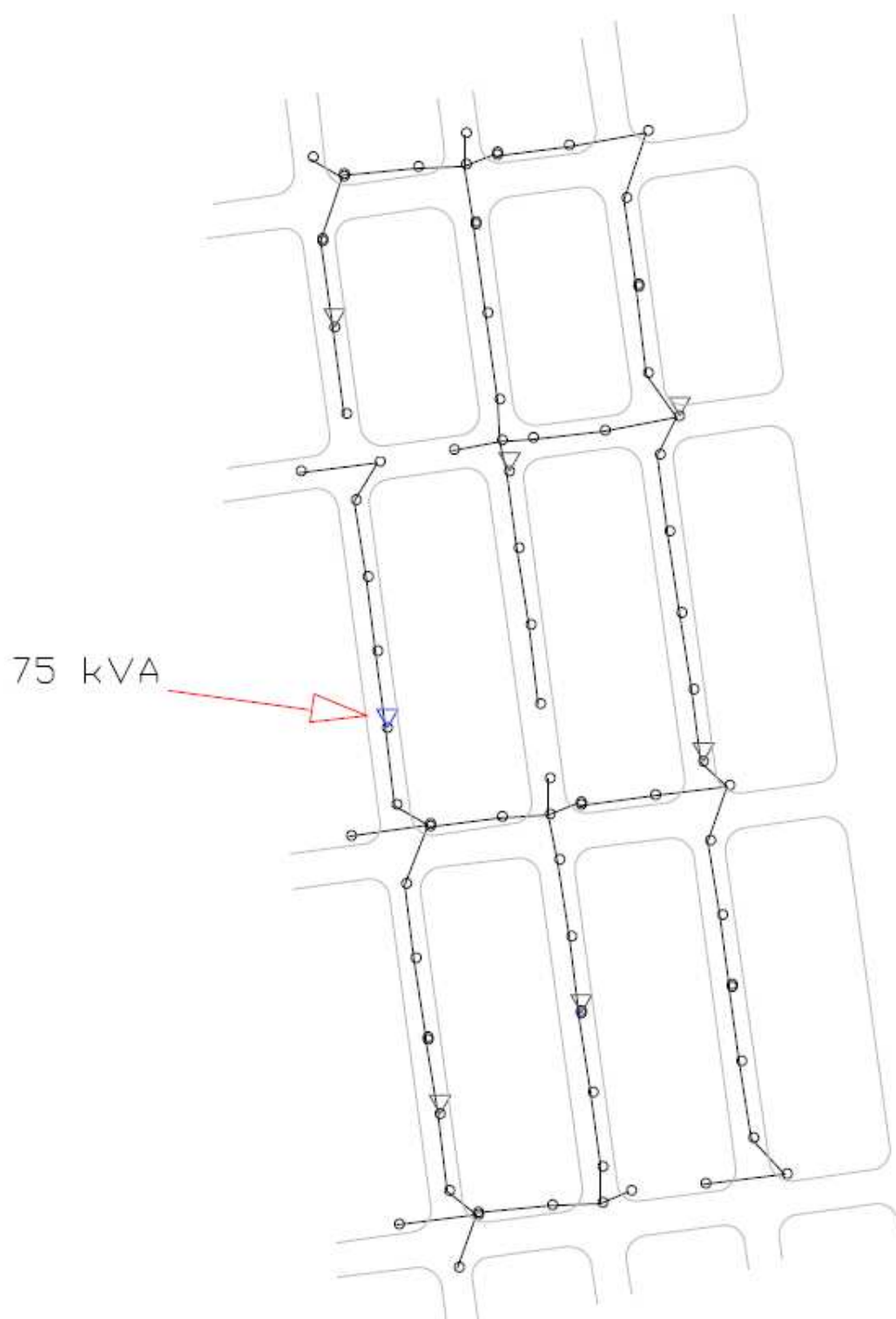


Figura 7.16 – Solução de melhoramento com troca de transformador de 45 kVA por 75kVA

Na Figura 7.17 é apresentada a solução proposta para a segunda situação simulada (foi liberada a modificação do circuito). Observa-se que o módulo proponente sugere uma divisão do circuito existente, criando um novo circuito com transformador de 30 kVA para atender a nova demanda. Nesse caso, o módulo Projeto de Execução também adiciona um novo transformador com a respectiva estrutura e fixação.

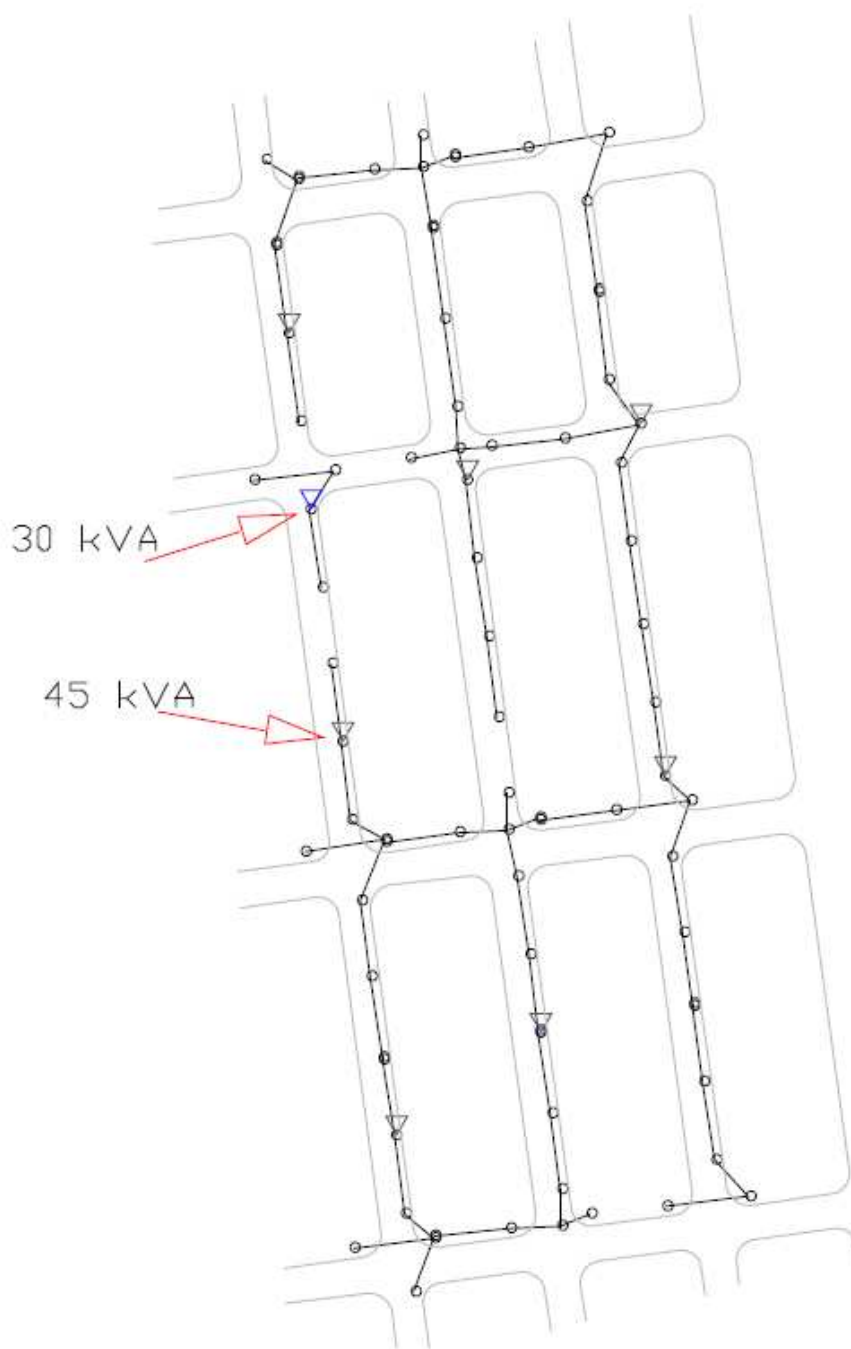


Figura 7.17 – Proposta de melhoramento com divisão de circuito

A Tabela 7.8 apresenta um comparativo entre as duas soluções encontradas para o problema de melhoramento. Pode ser observado que a primeira solução tem um custo total maior que a segunda (onde houve a divisão de circuito), ainda que exista apenas a troca de um transformador de 45 kVA por outro de 75 kVA. A justificativa para tal fato vem da redução das perdas elétricas alcançada com a divisão dos circuitos na segunda solução, já que o aumento de carga foi produzido no extremo do circuito e o novo transformador acrescentado (30 kVA) por ser de menor capacidade, com um custo menor que o utilizado na primeira solução (75 kVA).

Custo	Solução 1 (R\$)	Solução 2 (R\$)
Fixo	3.688,00	2.478,00
Variável	6.010,00	5.376,00
Total	9.698,00	7.854,00

Tabela 7.8 – Custo das soluções obtidas pelo proponente para o Caso 5

A escolha da solução a ser implementada fica a critério do especialista, já que o módulo proponente fornece ao especialista uma série de soluções com as quais poderá fazer uma análise mais rápida e adotar a solução mais adequada à situação.

Capítulo 8 - Considerações Finais e Trabalhos Futuros

8.1. Considerações

O paradigma de Sistema de Apoio à Decisão (SAD) mostra-se adequado à elaboração de projetos de distribuição de redes elétricas, proporcionando os seguintes benefícios:

- 1) Diminuição de erros. O auxílio na elaboração das etapas de projeto proporciona uma diminuição considerável de possíveis erros de projeto;
- 2) Obtenção de soluções de menor custo de execução. O emprego de procedimentos de inteligência computacional (metaheurísticas e sistemas especialistas) na concepção definida para o SAD orienta a busca por soluções de menor custo de execução e maior satisfação dos clientes, considerando a continuidade do oferecimento dos serviços de fornecimento de energia;
- 3) Redução no tempo de elaboração dos projetos. A automação das principais tarefas de elaboração de projetos (compreendendo interfaces gráficas, interligações com bancos de dados, fácil acesso ao planejamento da primária relacionada ao projeto, algoritmos rápidos para otimização de alternativas de projeto elétrico, cálculos mecânicos e elétricos e um sistema especialista para definição do projeto de execução) diminui o tempo gasto pelo projetista em cada projeto. Por exemplo, com a utilização do sistema especialista é possível ter uma proposta de projeto de execução em pouco mais de 1 minuto para um pequeno loteamento.

A arquitetura proposta para o SAD permite um alto grau de interatividade entre o projetista e os módulos: Interface Gráfica, Proponente, Cálculo Elétrico, Projeto de Execução, Detalhamento de Material e Estimativa de Orçamento. O SE desenvolvido possui uma boa performance computacional, levando-se em consideração as dificuldades inerentes à elaboração de projetos de execução de redes de distribuição.

No desenvolvimento do módulo Projeto de Execução, baseado na técnica de sistemas especialistas, pode-se constatar a importância e dificuldade da etapa de aquisição do conhecimento. Esta etapa foi o maior desafio na elaboração do SE. As outras etapas foram realizadas sem maiores problemas. O fato do engenheiro de conhecimento não possuir formação específica no domínio em que se insere a aplicação trouxe grandes dificuldades, superadas com o estudo aprofundado das normas técnicas, de projetos de rede já elaborados e sucessivas interações com o especialista.

Os casos apresentados no Capítulo 7 foram desenvolvidos procurando-se contemplar as particularidades dos vários projetos comumente realizados. Pode-se notar a contribuição da ferramenta para a execução de cada um dos projetos apresentados.

A metodologia atingiu os objetivos inicialmente propostos: auxiliar no desenvolvimento de projetos de execução, agilizando sua execução e facilitando as análises e as propostas técnicas do projetista.

8.2. Trabalhos futuros

Os resultados obtidos com o protótipo do SAD para elaboração de projetos de redes aéreas de distribuição são animadores e mostram os benefícios da aplicação de técnicas de inteligência computacional (metaheurísticas e sistemas especialistas) a problemas práticos e de grande importância para as concessionárias de energia elétrica. Para continuação deste trabalho são sugeridas as seguintes atividades:

- Refinar a base de conhecimento do sistema especialista por meio da interação com especialistas de outras concessionárias de energia elétrica para incorporar regras que definam elementos construtivos ainda não contemplados;
- Incorporar a lógica *fuzzy* na representação do conhecimento para tratar conhecimentos incertos, comuns à atividade de elaboração de projetos. O *Shell CLIPS* deverá ser substituído pelo *Shell Fuzzy CLIPS* e deverão ser implementadas as modificações necessárias no SAD;
- Melhorar o protocolo de comunicação entre os diversos módulos do SAD;
- Avaliar a usabilidade do SAD em ambiente de produção utilizando formulários em que os projetistas possam manifestar suas sugestões de melhoria. A partir do

resultado desta avaliação e do estudo de técnicas de Interface Homem-Máquina (IHM) pode-se melhorar a Interface do SAD.

- Implementar um sistema especialista baseado em casos para auxiliar na fase de definição dos tipos de projetos;
- Implementar mecanismos de explicação que respondam às seguintes questões: “Por quê?” e “Como?”. A pergunta “Por quê?” é respondida apresentando-se a última regra disparada e a pergunta “Como?” apresentado-se a sequência de regras disparadas.
- Aplicar métodos heurísticos para guiar a busca de regras no módulo de inferência do Sistema Especialista do módulo Projeto de Execução do SAD.

Referências Bibliográficas

- Anthony, R. N. (1965). Planning and Control System: A Framework for Analysis, Harvard University Graduate School of Business Administration, Cambridge, MA.
- Armstrong, M. P. e Densham, P. J. (1990). Database organization alternatives for spatial decision support systems, *International Journal of Geographical Information Systems* 3(1).
- Barr, A., Cohen, P. R. e Feigenbaum, E. A, eds. (1989). *The Handbook of Artificial Intelligence*, Vol.4, Addison-Wesley, Massachusetts.
- Bellman, R. E. e Zadeh, L. A. (1970). Decision-making in a fuzzy environment, *Management Science* 17: 141-164.
- Buchanan, B. G. e Feigenbaum, E. A. (1978). Dendral and meta-dendral: Their applications dimension, *Artificial Intelligence* 11(1-2): 5-24.
- Buchanan, B. G. e Shortliffe, E. H. (1984). *RULE-BASED EXPERT SYSTEMS. The MYCIN Experiments of the Stanford Heuristic Programming Project*, Addison-Wesley, Massachusetts.
- Caprara, A. e Fishetti, M. (1997). Branch-and-cut Algorithms, in M. Dell'Amico, F. Maffioli, and S. Martello, editors, *Annotated Bibliographies in Combinatorial Optimization*.
- Cavellucci, C., Lyra, C., Sa, J. E., Almeida, J., França, P. M., Garcia, V. J. (2004a). *Automação de Projetos de Redes de Distribuição de Energia Elétrica - Levantamento do estado do conhecimento*. CPFL/UNICAMP, RT1-CPFL-PD116 (Relatório Técnico).
- Cavellucci, C., Lyra, C., Sa, J. E., Gonzalez, J. F. V., Almeida, J., Queiroz, L. M., França, P. M., Garcia, V. J. (2004b). *Automação de Projetos de Redes de Distribuição de Energia Elétrica - Definição das técnicas e algoritmos de automação*. CPFL/UNICAMP, RT2-CPFL-PD116, (Relatório Técnico).

- Cavellucci, C., Lyra, C., Sa, J. E., Gonzalez, J. F. V., Almeida, J., Queiroz, L. M., França, P. M., Garcia, V. J. (2004c). Automação de Projetos de Redes de Distribuição de Energia Elétrica - Especificação do sistema de apoio à decisão. CPFL/UNICAMP, RT3-CPFL-PD116, (Relatório Técnico).
- Cavellucci, C., Lyra, C., Sa, J. E., Gonzalez, J. F. V., Almeida, J., Queiroz, L. M., França, P. M., Garcia, V. J. (2004d). Automação de Projetos de Redes de Distribuição de Energia Elétrica - Versão experimental do programa computacional de automação. CPFL/UNICAMP, RT4-CPFL-PD116, (Relatório Técnico).
- Cooke, D. F. (1992). Spatial decision support system: not just another GIS, *Geo Info Systems* 2(5): 46-49.
- Costa, A. M., Garcia, V. J., França, P. M. e Lyra, C. (2004). A New Method for Planning Secondary Distribution Networks. In: Fourth IASTED International Conference Power and Energy Systems, 2004, Rhodes. Proceedings of the Fourth IASTED International Conference Power and Energy Systems.
- Crossland, M. D., Wynne, B. E. e Perkins, W. C. (1995). Spatial decision support systems: An overview of technology and a test of efficacy, *Decision Support Systems* 14: 219-235.
- Densham, P. J. (1991). Spatial decision support systems, in D. Maguire, M. F. Goodchild e D. Rhind (eds), *Geographical Information Systems: principles and applications*, Vol. 1, Longman, London, pp. 403-412.
- Durkin, J. (1994). *Expert systems: design and development*. Prentice-Hall.
- Durkin, J. (1996). Expert Systems: A view of the field. *IEEE Expert*, Vol. 11. N. 2, April 1996.
- Fedra, K. (1995). Decision support for natural resources management: Models, gis and expert systems, *AI Applications* 9(3): 3-19.
- Fedra, K. e Feoli, E. (1998). GIS technology and spatial analysis in coastal zone management, *EEZ Technology* 3: 171-179.

- Forgy, C. L. (1982). A fast algorithm for the many pattern / many object pattern match problem, *Artificial Intelligence* 19: 17-37.
- Forsyth, R. (1989). *Expert System - Principles and Case Studies*, Chapman and Hall Computing, NY.
- Garcia, V. J., França, P. M., Cavelucci, C., Gonzalez, J. F. V. e Lyra, C.(2004). Consideração das Perdas Técnicas no Planejamento de Redes Secundárias de Distribuição de Energia Elétrica. In: XV Congresso Brasileiro de Automática, 2004, Gramado. Anais do XV Congresso Brasileiro de Automática, 2004.
- GED 3638: CPFL – Projeto de Rede de Distribuição – Terminologia.
- Geoffrion, A. M. (1983). Can or/ms evolve fast enough?, *Interfaces* 13: 10-25.
- Glover, F. e Laguna, M. (1997a). General purpose heuristics for integer programming – part i, *Journal of Heuristics* 2: 343-358.
- Glover, F. e Laguna, M. (1997b). General purpose heuristics for integer programming – part ii, *Journal of Heuristics* 3: 161-179.
- Gorry, G. A. e Scott-Morton, M. S. (1971). A framework for management information systems, *Sloan Management Review* 13(1): 50-70.
- Hall, G. B. (1997). *GIS-based Decision Support Architecture and Applications for Developing Countries South Information Systems: Principles and Applications*, John Wiley, New York.
- Harmon, P. (1985), *Expert Systems: Artificial Intelligence in Business*, J. Wiley, New York.
- Hayes-Roth, F., Waterman, D. A. e Lenat, D.B., eds. (1983). *Building Expert Systems*, Addison-Wesley, Massachusetts.
- Kandel, A. (1986). *Fuzzy Mathematical Techniques with Applications*. Addison-Wesley.

- Kiang, M. Y., Hu, M.Y, Fisher, D. M, (2006). An extended self-organizing map network for market segmentation – a telecommunication example, *Decision Support Systems*, 42: 36–47.
- Kim, Y., Street, W. N. (2004). An intelligent system for customer targeting: a data mining approach, *Decision Support Systems* 37: 215 – 228.
- Kolodner, J. L. (1983a). Indexing and retrieval strategies for natural language fact retrieval, *ACM Transactions on Database Systems* 8(3): 434 -464.
- Kolodner, J. L. (1983b). Reconstructive memory: A computer model, *Cognitive Science* 7(4).
- Lake, D. B. (1996). *Case-Based Reasoning*, AAAI / The MIT Press, California, chapter 1 - CBR in Context: Present and Future, pp. 3-30.
- Lam, M. (2004). Neural network techniques for financial performance prediction: integrating fundamental and technical analysis, *Decision Support Systems*, 37: 567– 581.
- Liebowitz, J. (1988). *Expert system applications to telecommunications*, J. Wiley.
- Luger, G. F. (2002). *Artificial Intelligence: structures and strategies for complex problem solving*, 4th edn, Addison-Wesley, London.
- Malczewski, J. (1998). Spatial decision support systems, NCGIA Core Curriculum in GIS-science, <http://www.ncgia.ucsb.edu/giscc/units/u127/u127.html>.
- Miranda, C. M. G., Ferreira, R. J. P., Gusmão, A. P. H. e Almeida, A. T. (2003). Sistema de apoio à decisão para seleção de atividades críticas no gerenciamento de projetos com avaliação multicritério, *Anais do XXIII Encontro Nac. de Eng. de Produção*, Ouro Preto, MG, Brasil.
- Nilsson, N. J. (1998). *Artificial Intelligence. A new synthesis*, Morgan Kaufmann, California.
- Owens, H. D. e Philippakis, A. S. (1995). Inductive consistency in knowledge-based decision support systems, *Decision Support Systems* 13: 167-181.

- Perrot, N., Corrieu, G., Trystram, G., Agioux, L., Ioannou, I., Mauris, G. (2004). Decision support system design using the operator skill to control cheese ripening - application of the fuzzy symbolic approach. *Journal of Food Engineering*, 2004 (Vol. 64) (No. 3) 321-333.
- Pressman, Roger S (1995). *Engenharia de Software / Tradução: José Carlos Barbosa dos Santos; revisão técnica: José Carlos Maldonado, Paulo César Masiero, Rosely Sanches*. São Paulo: Makron Books, 1995.
- Ray, J. J. (2007). A web-based spatial decision support system optimizes routes for oversize/overweight vehicles in Delaware. *Decision Support Systems* 43: 1171:1185.
- Rayward-Smith, V. J., Osman, I. H., Reeves, C. R. e Smith, G. D. (1996). *Modern Heuristic Search Methods*. John Wiley and Sons.
- Reeves, C. R. (1995). *Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*. Mc Graw-Hill, London.
- Ribeiro, R. A., Powell, P. L. e Baldwin, J. F. (1995). Uncertainty in decision-making: An abductive perspective, *Decision Support Systems* 13: 183-193.
- Russel, S. e Norvig, P. (1995). *Artificial Intelligence. A Modern Approach*, Prentice Hall, New Jersey.
- Shim, J. P., Warkentin, M., Courtney, J. F., Power, D. J., Sharda, R. e Carlsson, C. (2002). Past, present, and future of decision support technology, *Decis. Support Syst.* 33(2): 111-126.
- Simon, H. (1960). *The new science of management decision*, HarprkRow, New York.
- Sprague, R. H. e Watson, H. J. (1989). *Decision Support Systems - Putting Theory into Practice*, 2 edn, Prentice-Hall Inc.
- Stanford Medical Informatics (2004). *Smi research projects*.
- Turban, E. (1992). *Expert Systems and Applied Artificial Intelligence*, Macmillan Publishing Company, NY.

Uricchio, V. F., Giordano, R., Lopez, N. (2004). A Fuzzy Knowledge-based Decision Support System for GroundWater Pollution Risk Evaluation, *Journal of Environmental Management* (73): 189-197.

Waterman, D. A. (1986). *A Guide to Expert Systems*, Addison-Wesley.