



## XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco - Brasil

### Sistema de Apoio à Decisão para Projetos de Redes de Distribuição de Energia Elétrica

**Francisco José Bassotelli**  
Companhia Paulista de Força  
e Luz – CPFL  
bassotelli@cpfl.com.br

**Vinícius J. Garcia**  
Universidade Federal do  
Pampa – UNIPAMPA  
viniciusjg@smail.ufsm.br

**Leonardo M. O. de Queiroz**  
Universidade Estadual de  
Campinas – UNICAMP  
leonardo@denis.fee.unicamp.br

**José F. V. González**  
Universidade Estadual de  
Campinas – UNICAMP  
jfvfg@denis.fee.unicamp.br

**Joselaine de Almeida**  
Universidade Estadual de  
Campinas – UNICAMP  
jose@denis.fee.unicamp.br

**Paulo M. França**  
Universidade Estadual de  
Campinas – UNICAMP  
franca@denis.fee.unicamp.br

**Christiano Lyra Filho**  
Universidade Estadual de  
Campinas – UNICAMP  
chrlyra@denis.fee.unicamp.br

**Celso Cavellucci**  
Universidade Estadual de  
Campinas – UNICAMP  
celsocv@denis.fee.unicamp.br

#### Palavras-chave:

Otimização Combinatória  
Projetos de Redes de Distribuição  
Sistemas de Apoio à Decisão  
Sistemas Especialistas  
Sistemas de Potência

#### Resumo

Este trabalho descreve um Sistema de Apoio à Decisão (SAD) para projetos de redes aéreas de distribuição de energia elétrica. O sistema coloca à disposição do projetista de redes um conjunto de ferramentas computacionais capaz de auxiliá-lo na execução das tarefas para elaboração de projetos. Técnicas de otimização combinatória, sistemas especialistas e modelos de cálculos de fluxo de carga e estabilidade mecânica interagem para redução de custos, redução nos tempos de elaboração e melhoria na padronização dos projetos. Estudos de casos são apresentados para mostrar aplicabilidade do SAD em projetos de redes de distribuição.

#### 1. INTRODUÇÃO

Projetar redes de distribuição é tarefa que exige a reunião de diversas habilidades e conhecimentos que, para resultar em um projeto final, precisa fazer uso de normas técnicas, procedimentos empíricos, julgamento, bom senso, cálculos e uma considerável massa de dados. Por esta razão, é uma tarefa complexa e demorada.

É por meio das normas técnicas que se estabelecem os procedimentos técnicos e critérios básicos para assegurar as condições técnicas necessárias ao funcionamento do sistema de distribuição,

satisfazendo as condições de qualidade de fornecimento exigidas pelos órgãos reguladores e de fiscalização. Além disso, as normas técnicas estabelecem os níveis de segurança compatíveis com as necessidades operacionais da rede. Em adição às normas técnicas específicas, existem vários procedimentos que complementam ou detalham assuntos pertinentes ao projeto, somando grande quantidade de informações a serem usadas, estudadas e interpretadas pelos projetistas.

Os projetos de rede devem observar o planejamento básico para atender ao crescimento de carga de cada local ou região. Devem também considerar aspectos estéticos, de segurança e meio ambiente e sociais sem, no entanto, comprometerem 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.

Quando se buscam trabalhos abordando etapas entre o delineamento dos projetos, realizados no planejamento, e o detalhamento dos requisitos técnicos necessários à execução, depara-se com uma total escassez de contribuições. Conclui-se pois, que a abordagem do problema de elaboração e detalhamento do projeto através de técnicas de engenharia de sistemas é inovadora, sugerindo um novo campo de pesquisas na área de redes de distribuição de energia elétrica.

Este trabalho visa fundamentalmente descrever um sistema de apoio a decisões, capaz de apoiar a tarefa de elaborar projetos de redes de distribuição de energia elétrica. Na Seção 2 apresenta-se o modelo de automação para projetos de redes de distribuição. Na Seção 3 descreve-se a arquitetura do SAD com os respectivos módulos envolvidos. Estudos de caso são apresentados na Seção 4. Considerações finais são apresentadas na Seção 5.

## **2. PROJETOS DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO**

A elaboração de projetos de redes de distribuição compreende a execução dos procedimentos associados a cada tipo de projeto. Esses procedimentos resumem-se no encadeamento das atividades de projetar, detalhar as especificações do projeto e definir os materiais e mão de obra a serem usados. O objetivo fundamental é a criação de alternativas de soluções de engenharia para, posteriormente, selecionar a solução que melhor se adequa aos requisitos do projeto.

O processo tem início na classificação do tipo de projeto a ser realizado, considerando as características próprias de cada um deles. Como exemplo, a seguir são listados os tipos mais comuns de projetos de redes de distribuição:

- *ligações de novas cargas em baixa e média tensão* – projetos de extensões de rede para atender a ligações de novas cargas em média tensão (consumidores industriais e comerciais), edifícios, loteamentos, pedidos de ligações de terceiros e novas cargas próxima à rede existente;
- *núcleos habitacionais e loteamentos* – 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;
- *melhoramentos da rede* – projetos para modificar a rede significativamente, alterando sua configuração física e/ou elétrica para atender ao crescimento de carga na área, eliminando deficiências técnicas para manter os níveis de qualidade e realizando reforços estruturais para suportar os esforços devido à ocupação de terceiros (por exemplo, utilização da estrutura da rede por empresas de tv a cabo).

Definido o tipo de projeto, um levantamento de campo é realizado com os seguintes propósitos principais: legitimar os dados registrados em mapas e cadastrados nos sistemas de informação; verificar as condições físicas dos elementos das redes primárias e secundárias; avaliar os tipos de carga e as condições físicas existente do local do projeto. Em seguida, define-se os critérios de projeto a serem utilizados e elabora-se uma alternativa de engenharia para o projeto. Essa alternativa pode ou não ser aceita. Se for aceita, o projeto é detalhado e encaminhado para sua execução. Caso seja

rejeitada, o processo é reiniciado, revendo-se os critérios de projeto e gerando-se uma nova alternativa. O procedimento é repetido, até que uma alternativa seja considerada adequada.

Projetos de redes de distribuição são elaborados segundo normas técnicas, que estabelecem critérios básicos e procedimentos técnicos para garantir as condições operacionais e a qualidade de fornecimento estabelecido pelos órgãos reguladores. Porém, o cumprimento das normas não garante a melhor solução técnica, nem de menor custo, pois existe um conjunto de soluções de engenharia que atendem plenamente aos requisitos estabelecidos nas normas. Portanto, a elaboração do projeto exige dos projetistas critérios próprios para identificar a melhor solução de engenharia do projeto. Esta observação evidencia a complexidade de automatizar o processo de elaboração de projetos, caracterizando a necessidade de estabelecer um modelo para a automação.

### 3. ARQUITETURA DO SISTEMA

Em consequência das necessidades práticas, dos requisitos desejáveis e das circunstâncias envolvendo todo o processo de desenvolvimento de projetos em redes de distribuição de energia elétrica, concebeu-se uma estrutura de sistema baseada na arquitetura de um Sistema de Apoio à Decisão (SAD)<sup>1</sup>. Conceitualmente, a arquitetura geral do SAD pode ser representada pelo relacionamento entre o usuário, interface, base de dados e base de modelos, conforme ilustra o diagrama mostrado na Figura 1. A interface tem o objetivo de proporcionar a interação entre o usuário e o SAD. A Base de Dados é o repositório de todos os dados necessários para a solução do problema, incluindo dados de origem textual, numérica e gráfica. Na Base de Modelos residem todos os procedimentos, técnicas e algoritmos, que serão usados de forma interativa e recursiva, na busca de uma solução adequada ao problema.

A arquitetura geral do SAD pode ser aplicada ao problema de automação de redes de distribuição, conforme mostra o diagrama apresentado na Figura 2.

A Interface tem dois módulos: *Visual* e *Funcional*. No módulo Visual o usuário pode executar funções de visualização e edição gráfica. O módulo funcional inclui funções básicas utilizadas na preparação dos dados de entrada do sistema – alocação de postes, transformadores, trechos primários, trechos secundários e consumidores.

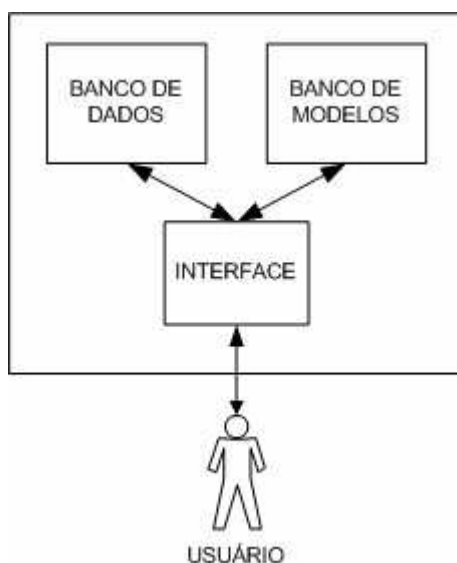
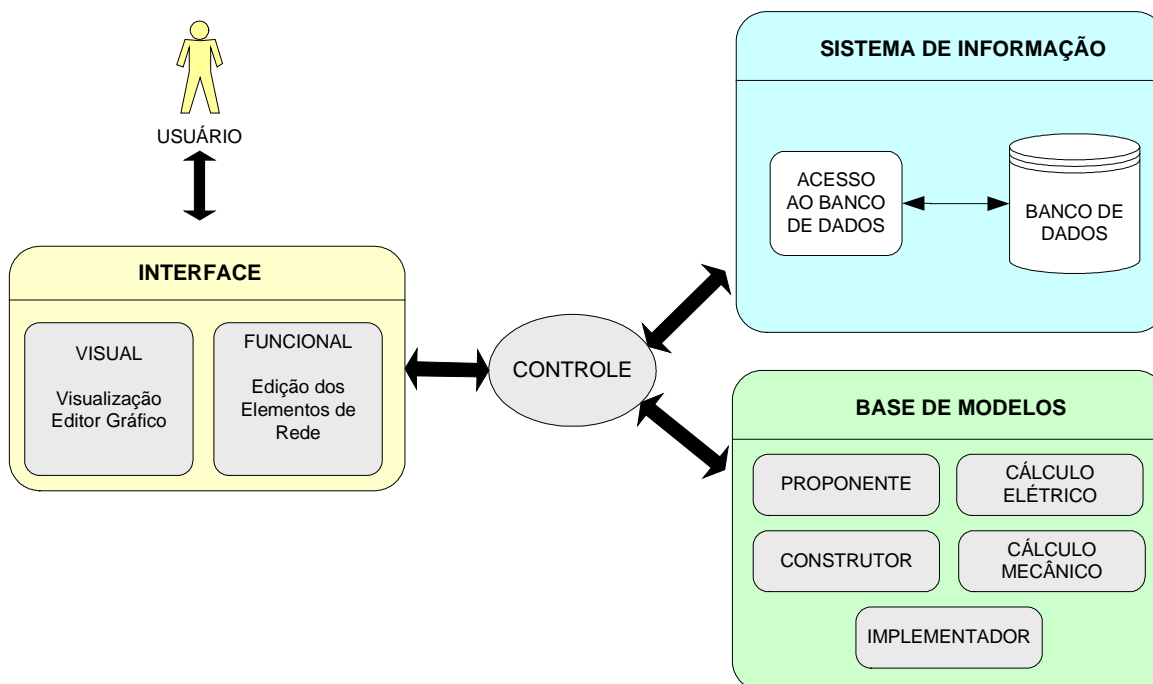


Figura 1. Arquitetura de Sistema de Apoio à Decisão.



**Figura 2. Arquitetura do SAD para projetos de rede de distribuição de energia elétrica.**

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, construtor, cálculo elétrico, implementador e cálculo mecânico. Cada um desses módulos tem sua função específica no projeto, e pode interagir entre eles. Estes módulos são detalhados a seguir.

### 3.1. MÓDULO PROPONENTE

A função do módulo Proponente é elaborar alternativas de projetos de redes de menor custo possível, determinando a localização para instalação de transformadores de distribuição e o traçado dos circuitos primário e secundário. O circuito primário refere-se a ligação do transformador de distribuição ao alimentador de distribuição de energia elétrica. O modelo adotado para o módulo Proponente considera os limites elétricos dos condutores e dos transformadores e a adequação dos níveis de tensão aos padrões determinados pela agência reguladora, usando o módulo Cálculo Elétrico.

A complexidade matemático-computacional deste problema levou a uma abordagem hierárquica de três sub-problemas:

***p1: Localização e Dimensionamento dos Transformadores***

Escolhe os melhores locais (poste) para instalar um determinado número  $p$  de transformadores e define a capacidade mais adequada.

***p2: Problema do Roteamento Primário***

Determina a melhor interconexão dos  $p$  transformadores aos alimentadores primários existentes e a bitola dos cabos.

***p3: Problema do Roteamento Secundário***

Determina o melhor traçado dos circuitos de cada transformador e o dimensionamento ótimo dos condutores utilizados.

Um procedimento de *múltiplos reinícios* foi escolhido para solucionar o problema de projetos de redes, conforme detalhado em pseudo-código na Figura 3. Existem dois laços no procedimento descrito: o primeiro, entre os passos 3 e 16, se destina a estabelecer o número de circuitos. O segundo, entre os passos 6 e 13, realiza os múltiplos reinícios até que o *número\_de\_iterações\_MAX* seja

```
1. faça melhor_solução := 0;
2. faça número_de_transformadores := número_de_transformadores_INICIAL;
3. enquanto número_de_transformadores < número_de_transformadores_MAX faça
4.     DefineSoluçãoInicial();
5.     melhor_solução_iteração := custo_da_solução_inicial;
6.     enquanto número_de_iterações < número_de_iterações_MAX faça
7.         LocalizaTransformadores();
8.         CalculaDemanda();
9.         DeterminaPotência();
10.        DeterminaRoteamentoSecundária();
11.        DeterminaTraçadoPrimário();
12.        se custo_da_solução_atual < melhor_solução_iteração;
13.            melhor_solução_iteração := custo_da_solução_atual;
14.        se melhor_solução_iteração < melhor_solução;
15.            melhor_solução := melhor_solução_iteração;
16.        número_de_transformadores := número_de_transformadores + 1;
17. retorna melhor_solução
```

---

**Figura 3. Algoritmo implementado no módulo Proponente.**

atingido. No passo 4 é construída uma solução inicial factível, fazendo-se uma escolha aleatória para localização de dado *número\_de\_transformadores*.

A localização dos transformadores de distribuição (método *LocalizaTransformadores*, passo 7) corresponde a resolver um problema de *p*-medianas não capacitado<sup>2</sup>, caracterizando um problema de otimização combinatória para encontrar o local de instalação de *p* transformadores, de modo que cada nó de demanda seja conectado ao transformador mais próximo e a soma dos momentos elétricos (distância x demanda) seja minimizada. A capacidade dos transformadores é selecionada considerando o somatório das demandas dos consumidores atendidos pelo transformador.

Depois de determinada a localização dos transformadores, determina-se a demanda de cada consumidor e a demanda total dos circuitos secundários (método *CalculaDemanda*, passo 8). Feito isso, calcula-se a potência adequada para os transformadores (método *DeterminaPotência*, passo 9).

O roteamento dos circuitos secundários (método *DeterminaRoteamentoSecundário*, passo 10) baseia-se na busca de caminhos mínimos entre todos os pontos da rede, obtida por meio do algoritmo de Dijkstra<sup>3</sup>, e na curva de condutores econômicos que relaciona o custo fixo do metro linear e a perda no condutor com o fluxo de potência. Para tanto, o módulo *Proponente* aciona o módulo *Cálculo Elétrico* que calcula os fluxos de potência dos segmentos do circuito secundário pertencentes aos caminhos entre cada consumidor e o transformador no qual ele está alocado.

A determinação dos traçados dos circuitos primários (método *DeterminaTraçadoPrimário*, passo 11) compreende a escolha dos arcos (segmentos do circuito primário) que formam o caminho entre cada transformador e o ponto mais próximo do alimentador primário. Esse problema pode ser modelado como um problema de Steiner<sup>4</sup>, que corresponde a conectar um conjunto de nós de um grafo com custo mínimo. No caso de projetos de redes, o conjunto de nós está associado aos postes, onde estão instalados os transformadores, e os possíveis pontos de ligação ao alimentador primário.

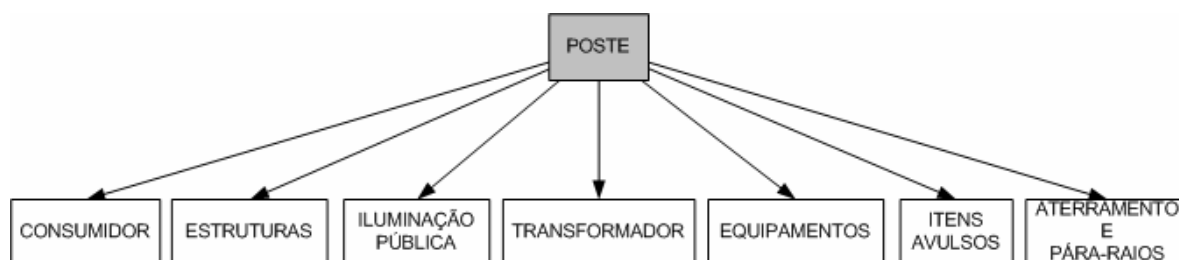
### 3.2. MÓDULO CONSTRUTOR

O objetivo do módulo Construtor é detalhar cada elemento da rede proposta em seus componentes físicos: estrutura primária, estrutura secundária, fixações, postes, cabos, amarrações e conexões. Ele foi desenvolvido utilizando técnicas de sistemas especialistas<sup>5</sup>. Regras de engenharia baseadas nas normas técnicas, padrões e no conhecimento prático dos projetistas de rede foram descritas como regras de produção do tipo *se as premissas são verdadeiras então execute ações*<sup>6</sup>. Por exemplo, a

definição de uma estrutura primária pode ser assim declarada na base de conhecimento do sistema especialista:

*Se* a rede é do tipo compacta *E* é fim da rede  
*Então* a estrutura primária é CE3

Um conjunto de 1654 regras compõe a base de conhecimento para projetos de redes de distribuição do sistema especialista. Para melhorar o desempenho do sistema especialista, este conjunto de regras está estruturado numa árvore de contextos, conforme ilustra o diagrama mostrado na Figura 4.



**Figura 4. Estrutura em árvore de contexto da base de conhecimento do sistema especialista.**

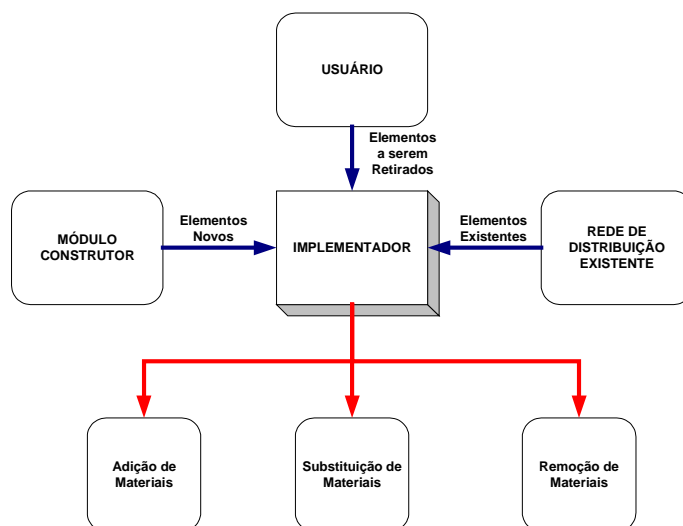
A estrutura apresentada na Figura 4 permite ao sistema especialista simular o raciocínio do projetista através de cada um dos contextos que compõe o projeto de rede. O contexto básico é o Poste, que determina o tipo de poste e sua estabilidade mecânica utilizando o módulo Cálculo Mecânico. Porém para que seja possível concluir o projeto é necessário resolver os demais contextos:

- **consumidor**, define o tipo de ligação de consumidores primários e secundários, no caso de consumidores secundários é definido o ramal de ligação;
- **estruturas**, determina os tipos de estruturas, primárias e secundárias, e suas respectivas fixações e amarrações;
- **iluminação pública**, define a ligação e a fixação do braço;
- **transformador**, define o tipo de estrutura e suporte do transformador e sua fixação;
- **outros equipamentos**, inclui a definição do tipo e da fixação de chaves corta circuitos, chaves fusível, chaves faca, religador, seccionalizador, regulador de tensão e banco de capacitores;
- **itens avulsos** de fixação e ligação;
- **aterramento e pára-raios**.

A simulação do raciocínio é repetida para todos os poste incluídos no projeto proposto pelo módulo Proponente ou pelo projetista.

### **3.3. MÓDULO IMPLEMENTADOR**

A solução de engenharia para um projeto de rede é traduzida numa lista de materiais e no valor da mão de obra definida pelas operações de adição, retirada e substituição de elementos de rede. O módulo Implementador associa cada componente do projeto aos respectivos materiais e mão de obra necessária para sua construção. O diagrama apresentado na Figura 5 ilustra o processo de decisão simulado pelo módulo Implementador.



**Figura 5. Processo de decisão do módulo Implementador.**

Os novos elementos a serem adicionados à rede são definidos pelo módulo Construtor através das regras de engenharia. O módulo Implementador verifica a existência, ou não, desses elementos na rede de distribuição existente. Se os elementos que estão sendo adicionados à rede pertencerem à mesma família de materiais dos elementos existentes (por exemplo, condutores do mesmo tipo), então os elementos existentes são substituídos pelos novos. Caso contrário, se os elementos pertencem a famílias de materiais diferentes (por exemplo, condutores de tipos diferentes), então são relacionados os elementos a serem adicionados e aqueles a serem removidos. Os elementos que devem ser apenas retirados da rede de distribuição são informados pelo projetista.

### **3.4. MÓDULO CÁLCULO ELÉTRICO**

Para validar os parâmetros elétricos de um projeto utiliza-se o módulo de Cálculo Elétrico. Ele realiza a verificação dos limites de tensão e corrente nas linhas de distribuição através de um método de fluxo de potência.

Os dados de entrada desse módulo são: o nó de referência (transformador de distribuição ou disjuntor do alimentador), o conjunto de nós, com suas respectivas cargas, e os arcos, com os respectivos condutores associados.

Um algoritmo de dois passos foi utilizado. No passo 1 são obtidos os fluxos de potência em cada arco da rede, utilizando procedimento baseado no *back-forward sweep* apresentado por Shirmohammadi, Hong, Semlyen, Luo<sup>7</sup>. Após o cálculo dos fluxos de potência, os limites de corrente e tensão são verificados (no passo 2), validando ou não o projeto.

### **3.5. MÓDULO CÁLCULO MECÂNICO**

Este módulo faz a verificação das condições mecânicas de cada poste, garantindo sua integridade e estabilidade. Para tanto, utiliza um método analítico de cálculo da resultante dos esforços aplicados ao longo do poste, considerando esforços devido à rede primária, rede secundária, equipamentos e terceiros (rede telefônica e teve à cabo). A resultante calculada é comparada com a resistência nominal do poste (multiplicada por um fator de sobrecarga admitido), determinando a validade do projeto proposto.

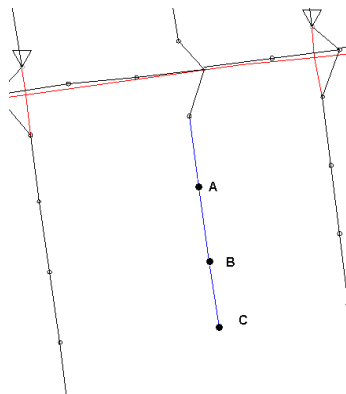
## **4. ESTUDOS DE CASOS**

Nesta seção são apresentados dois estudos de caso para mostrar aplicabilidade do sistema desenvolvido para automação de projetos de redes de distribuição. Considerando as semelhanças entre

os três tipos de projetos relacionados na Seção 2, optou-se por exemplos de ligações de novos clientes e o projeto de um núcleo habitacional típico, que evidenciassem com mais propriedade os aspectos relativos à dificuldade no projeto de redes.

#### **4.1. LIGAÇÃO DE NOVAS CARGAS EM BAIXA E MÉDIA TENSÃO**

A Figura 6 ilustra uma situação onde três clientes de baixa tensão e demanda relativamente baixa solicitam atendimento (pontos A, B e C na figura 6).



**Figura 6. Estudo de ligação de novas cargas.**

O projeto é de pequena complexidade; nesses casos, é comum o usuário do sistema propor os condutores sem auxílio do módulo Proponente. Apesar disso, nada impede que se utilize o módulo Proponente para fazer o dimensionamento dos condutores.

Nesse caso, o projetista decide que não será 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 azul na figura 6), selecionando quais condutores utilizará e os pontos onde serão colocados postes (no caso, nos pontos A, B e C).

A partir dessa etapa, o módulo Construtor é acionado para realizar o projeto construtivo da rede. O Construtor aciona internamente o módulo Cálculo Mecânico para fazer o dimensionamento dos postes. Os elementos de rede selecionados pelo módulo Construtor para essa situação são, dentre outros, postes, estruturas secundárias, fixações das estruturas secundárias e amarrações secundárias. O projetista pode alterar a saída do Construtor, adicionando ou removendo elementos da lista.

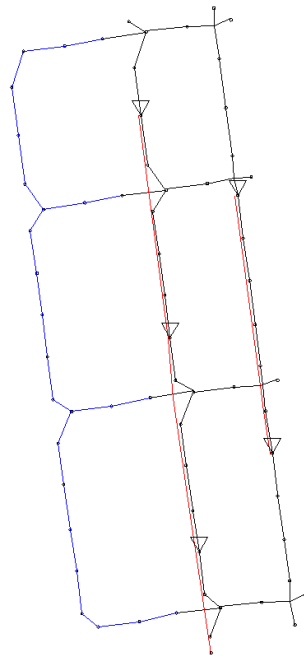
O módulo Implementador é acionado para montar a saída final do projeto. Para isso, ele utiliza a saída do Construtor e informações sobre o estado inicial da rede (rede existente). Como nesse caso não houve mudanças na rede existente, todos os novos elementos serão adicionados e não haverá nenhuma substituição, ou retirada, de materiais no projeto.

#### **4.2. NÚCLEO HABITACIONAL**

A Figura 7 ilustra um pequeno núcleo habitacional solicitando atendimento: a parte que inclui os segmentos em vermelho (primária) e preto (secundária) corresponde à rede existente, enquanto os segmentos em azul correspondem à rede proposta. Os triângulos representam os transformadores; neste caso, são cinco transformadores existentes.

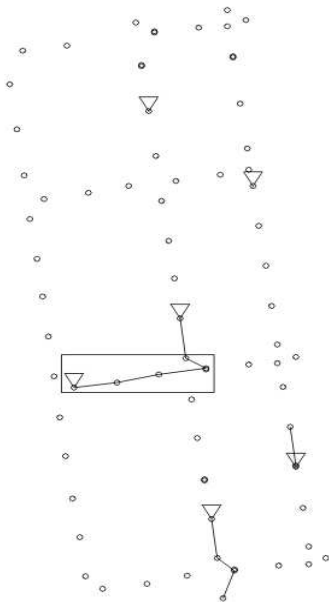
O usuário do sistema deve informar os pontos e vãos (em azul na Figura 7) como entrada para o SAD. Os pontos são os locais onde serão instalados postes e os vãos são os possíveis traçados para a rede, ou seja, o SAD só poderá propor condutores nos vãos indicados, não sendo necessário que existam condutores em todos os vãos.



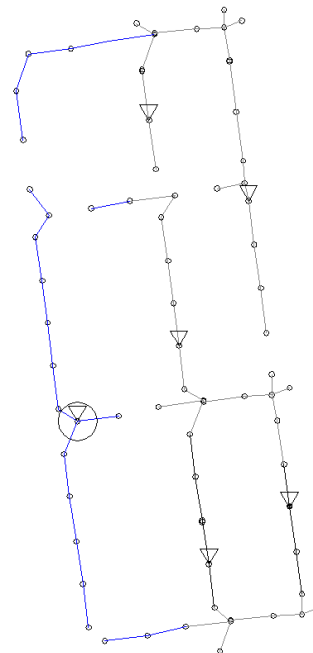


**Figura 7. Estudo de projeto de núcleo habitacional.**

As figuras 8 e 9 apresentam, respectivamente, as redes primária e secundária propostas pelo sistema desenvolvido, considerando a expansão apresentada na Figura 7. O objetivo fundamental é expandir a rede, promovendo a mínima intervenção na rede existente, mas sem deixar de observar as condições elétricas. O consumo da rede a ser construída fez com que fosse criado um novo circuito secundário, o que não implicou na mudança dos circuitos existentes. Na Figura 8, o novo transformador, visualizado dentro do retângulo, ocasionou uma pequena extensão da rede primária para alimentá-lo na localização que o sistema determinou como mais adequada.



**Figura 8. Rede primária depois da expansão.**



**Figura 9. Rede secundária depois da expansão.**

Na rede secundária resultante, ilustrada pela Figura 9, percebe-se que a expansão ocasionou a criação de um novo circuito, fazendo com que o número de transformadores passasse de 5 para 6. Contudo, esse novo circuito não foi capaz de incorporar todos os pontos de demanda; houve a necessidade de passar parte desses pontos de demanda para o circuito superior e a outra parte para o circuito inferior (segmentos em azul).

As Figuras 8 e 9 ilustram a rede a ser construída, com os devidos traçados da rede primária e secundária e o ponto onde será instalado um novo transformador; essa é a saída do módulo Proponente. Após esta etapa, o módulo Construtor é acionado para determinar quais elementos de rede devem ser colocados no projeto. A saída desse módulo é uma lista de elementos de rede, ordenados por poste. Dentre esse elementos podemos citar: postes; estruturas primárias e secundárias; amarrações dos condutores nas estruturas; fixações das estruturas.

Para ilustrar o procedimento de escolha de elementos, toma-se como exemplo o poste onde foi instalado o novo transformador, ressaltado com o círculo na Figura 9. Inicia-se com a escolha do poste. Isso é feito através da determinação de sua altura e do esforço que o mesmo deve suportar; como resultado, o Construtor sugere um poste de concreto de 12 metros de 400 daN. Posteriormente, é feita a seleção das estruturas primárias e secundárias responsáveis pela sustentação dos condutores no poste. Nessa etapa são considerados, dentre vários fatores, o tipo dos condutores e os ângulos formados entre eles. Ressalta-se que pode ser necessária mais de uma estrutura primária e/ou secundária para o mesmo poste. Os demais elementos são selecionados de forma semelhante; normalmente uma certa escolha depende dos outros componentes previamente selecionados. A Figura 10 mostra a lista de códigos dos componentes do projeto, conforme norma da concessionária.

```
Poste 82
Dimensionamento: 12/4
Estruturas Primárias: CE3
Estruturas Secundárias: S21D
Fixação Primária: FIXP6055
Fixação Secundária: FIXS011
Amarração Primária: AMAP6097
Amarração Secundária: AMAS013 AMAS020
Id_Trafo: TR30d
Estrutura Trafo: CE3TR
Fixação Trafo: TR043
```

**Figura 10. Lista dos componentes do projeto de poste com transformador instalado.**

## **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste trabalho apresentou-se um sistema de apoio à decisão para auxiliar o desenvolvimento de projetos de redes de distribuição de energia elétrica. Através de uma arquitetura flexível, agregam-se várias técnicas e algoritmos em módulos específicos e inter-relacionados, cada qual desempenhando uma função diferente durante o projeto.

Foram descritos módulos para as seguintes funções: gerar alternativas ótimas de projeto; dimensionar postes e estabelecer os componentes do projeto como estruturas, amarrações e fixações; executar cálculo de tensões e correntes; verificar a estabilidade mecânica de postes, considerando o circuito primário, circuito secundário, equipamentos e uso do poste por terceiros (redes de telefonia e tv a cabo). Esses módulos foram desenvolvidos com a utilização de técnicas de otimização combinatória, sistemas especialistas e modelos de cálculos de fluxo de carga e estabilidade mecânica.

Considerando-se o escopo de utilização do sistema proposto, é possível delinear os principais benefícios esperados ao se introduzirem ferramentas computacionais no processo de elaboração de projeto de redes aéreas de distribuição:

- **Redução da dispersão das soluções de projeto** – a adoção de aplicativos que otimizam e direcionam escolhas dentre uma vasta gama de alternativas limita a subjetividade na elaboração de projetos de rede, resultando numa maior padronização na aplicação dos procedimentos e critérios;
- **Diminuição de erros** – como subproduto, mas de importância primordial, a automação das etapas de projeto também deve causar uma diminuição considerável de possíveis erros inerentes ao processo manual;
- **Soluções de menor custo de execução** – o emprego de técnicas de inteligência computacional no sistema de apoio a elaboração de projetos orienta a busca por soluções de menor custo de execução, mas satisfazendo um conjunto de requisitos de qualidade;
- **Menor tempo de elaboração e simulação dos projetos** – a automação das principais tarefas de elaboração de projetos, usando interfaces gráficas, interligações com bancos de dados, algoritmos rápidos para otimização de alternativas e cálculos mecânicos e elétricos, certamente resultará em redução dos tempos de elaboração de projetos.

A continuidade desse trabalho assinala temas como: a aplicação de técnicas de otimização multiobjetivo na procura de alternativas de projetos de menor investimento e maior confiabilidade do sistema; a aplicação de técnicas de otimização combinatória na busca do equilíbrio das fases dos transformadores; o desenvolvimento de ferramentas computacionais de depuração da base de conhecimento utilizando técnicas de inteligência artificial.

## AGRADECIMENTOS

Os autores são muito gratos ao apoio da FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e CPFL (Companhia Paulista de Força e Luz CPFL).

## REFERÊNCIAS

- 1 SPRAGUE, R. H. & WATSON, H. J. Decision Support Systems – Putting Theory into Practice, 2ed., Prentice Hall, 1989.
- 2 GOLDBARG, M. C. & LUNA, H. P. Otimização Combinatória e Programação Linear, Editora Campus, 2000.
- 3 AHUJA, R., MAGNANTI, T. & ORLIN, J. Network Flows: Theory, Algorithms and Applications, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1993.
- 4 GOEMANS, M. X. & MYUNG, Y.-S. A catalog of Steiner tree formulations, Networks 23, 1993, pp. 19-28.
- 5 RUSSEL, S. & NORVIG, P. Artificial Intelligence. A Modern Approach. 2nd edition, Prentice Hall, 2002.
- 6 NILSON, N. J., Artificial Intelligence. A new synthesis. Morgan Kaufmann, California, 1998.
- 7 SHIRMOHAMMADI, D., HONG, H. W., SEMLYEN, A. & LUO, G. X. A Compensation-Based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks. IEEE. Transactions on Power Systems, vol. 3, n. 2, 1988, pp. 753-762.