

# Sistema Elaborador de Sequenciamento de Manobras

A. L. Oliveira, GAGTD/EPUSP; L. C. Magrini, GAGTD/EPUSP; M. L. B. Meloni, CTEEP; J. A. Jardini GAGTD/EPUSP.

**Resumo** - Um sistema computacional foi desenvolvido tendo como objetivo auxiliar o processo de análise e elaboração do programa de manobras, que é o documento onde consta a seqüência lógica de comandos e ações a serem executadas por operadores de subestação quando do impedimento ou normalização de qualquer equipamento do sistema elétrico. A ferramenta computacional elaborada permite ao usuário interagir visualmente com os equipamentos manobráveis através de uma interface gráfica. Nesta interface, para cada manobra simulada, este programa analisa o estado de energização resultante para todos os equipamentos à jusante e apresenta graficamente o fluxo de energia. O sistema também auxilia a tarefa através da verificação automática das regras de intertravamento da subestação.

**Palavras-chave** - Manutenção, programação de manobras, simulação, subestação, teoria dos grafos.

## I. INTRODUÇÃO

Freqüentemente um ou mais equipamentos de uma subestação necessitam ser impedidos para uma manutenção preventiva ou corretiva. Dentre os diversos procedimentos necessários para o impedimento ou normalização de qualquer equipamento do Sistema Elétrico, a CTEEP necessita elaborar um documento (Programa de Manobras) contendo a seqüência lógica de comandos e ações a serem executadas pelos Operadores de Subestação. Atualmente a CTEEP elabora e digita manualmente os Programas de Manobras que são inseridos no sistema PIO (Programa de Impedimento Operativo), responsável pelo gerenciamento. Desta forma, a etapa de elaboração da seqüência de manobras está sujeita a uma falha humana seja ela de natureza técnica ou de digitação.

O sistema PIO gerencia todo o “workflow” de solicitação de impedimentos, e é disponibilizado na Intranet corporativa da CTEEP, possibilitando assim que através de um formulário eletrônico seja possível registrar o Programa de Manobras. Embora que não exista nenhum tipo de automatismo no preenchimento dos campos referentes ao Programa de Manobras, existem algumas regras a serem seguidas durante o preenchimento.

Com o objetivo de acelerar a elaboração do Programa de Manobras, foi desenvolvida uma ferramenta computacional que permita à equipe técnica interagir visualmente com o diagrama unifilar da subestação desejada. Nesta interface gráfica, para cada manobra simulada, este programa irá analisar o estado de energização resultante para todos os equi-

pamentos à jusante e refleti-la graficamente, de modo que os equipamentos (barramentos, disjuntores, transformadores e chaves) por onde houver fluxo de corrente serão exibidos no diagrama unifilar na cor vermelha e os desenergizados na cor verde. A possibilidade de se utilizar a própria base de dados de diagramas unificares já utilizados pelos operadores para a criação da interface gráfica do sistema, traz como benefícios: familiaridade ao usuário na utilização da interface, além de tornar desnecessário o retrabalho na construção e manutenção de uma interface gráfica específica do sistema para cada uma das subestações.

Foi desenvolvido um algoritmo de simulação da subestação baseado na Teoria dos Grafos, que capacita o sistema a extrair as conectividades elétricas entre os equipamentos da subestação, a partir do diagrama unifilar, e dessas conectividades gera um grafo de modelagem da subestação.

Ao mudar o estado das chaves e disjuntores através da interface gráfica, estas manobras serão validadas por algoritmos computacionais que terão seu resultado refletido automaticamente no diagrama unifilar da subestação escolhida. Sendo que a simulação da manobra leva em conta os intertravamentos lógicos ou elétricos existentes entre as instalações da subestação, bem como possíveis impedimentos de outros equipamentos na subestação que deveriam participar da manobra. As regras de intertravamento da subestação podem ser programadas através de uma outra interface gráfica, e salvas numa base de dados auxiliando o planejamento do sequenciamento das manobras por parte do usuário.

O sistema estará sendo integrado com o Sistema de Supervisão e Controle da CTEEP, para que este apresente graficamente ao usuário o estado corrente das chaves e disjuntores da subestação, como estado inicial da seqüência de manobras. Além disso, este sistema estará integrado ao PIO para que após o usuário definir qual é o conjunto de manobras adequado ao impedimento desejado, estes resultados sejam transferidos diretamente para o sistema gerenciador de manobras da concessionária, evitando assim erros de digitação na transferência destas informações. Atualmente não existe um produto similar no mercado que possibilite a integração com o Sistema de Supervisão e Controle (SSC), que permita a interação visual com o diagrama unifilar da subestação desejada e que exporte as manobras simuladas com sucesso, diretamente ao PIO.

A estrutura deste artigo segue as diferentes etapas de implementação do projeto: A seção II trata da interface gráfica do sistema. A seção III trata modelagem e simulação elétrica da subestação. A seção IV descreve o tratamento dos intertravamentos da subestação. A seção V apresenta o processo de elaboração de manobras através do sistema desenvolvido. A seção VI apresenta a integração do sistema com os sistemas legados da CTEEP. A seção VII apresenta as conclu-

---

A. L. Oliveira, L. C. Magrini e J. A. Jardini pertencem ao Grupo de Automação em Geração, Transmissão e Distribuição Elétrica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (e-mail: alex.lopes@poli.usp.br).

M. L. B. Meloni trabalha no Centro Regional de Operação Bauru da Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista (e-mail: mmeloni@ctEEP.com.br).

sões do projeto e a seção VIII é dedicada as referências bibliográficas.

## II. INTERFACE GRÁFICA

A decisão de se utilizar a própria base de dados de diagramas unifilares, de representação das subestações, para a geração da interface gráfica do sistema, traz como benefícios:

- familiaridade ao usuário na utilização da interface, por ser idêntica ao principal documento de consulta na elaboração do Programa de Manobras;
- torna desnecessário o retrabalho de construção e manutenção de uma interface gráfica específica para o sistema a ser desenvolvido, para cada uma das subestações. No caso da CTEEP, mais de 100 subestações estão sob sua coordenação.

A partir desta decisão foi estudado como seria feita a interface gráfica do sistema, a partir de diagramas gerados por ferramenta CAD, de maneira automática pelo próprio sistema desenvolvido. Foram consideradas as exigências do sistema, expostas nos seguintes itens:

- identificação no desenho dos equipamentos manobráveis;
- reconhecimento da conectividade elétrica entre estes elementos;
- possibilidade de interação do usuário com os equipamentos manobráveis graficamente via mouse.

Os programas tipo CAD trabalham com arquivos gráficos no formato vetorial específicos do fabricante, o que nos direcionou para a utilização do DXF. O formato mais recomendado é o DXF, "Drawing Exchange Format", um protocolo aberto no qual o desenho é representado por uma descrição textual possibilitando a troca de arquivos entre um sistema de CAD e outros programas [1].

Quanto à identificação no desenho dos elementos manobráveis foi adotada uma padronização. Cada equipamento manobrável teve o seu conjunto de primitivas geométricas (linhas, polígonos, etc.), de representação gráfica, agrupados em blocos. Cada bloco foi nomeado com a própria identificação do equipamento atribuída pela empresa. A versatilidade da utilização dos blocos, que atuam como entidades do sistema CAD, está principalmente na rapidez de localização dos elementos, já que passam a ter os mesmos nomes dos equipamentos.

Foi desenvolvido um recurso computacional, no próprio sistema desenvolvido, que gera automaticamente as conexões elétricas a partir dos diagramas unifilares. Este recurso é acionado somente uma única vez, identificando os elementos geométricos de conexão elétrica, e verificando as suas conectividades procurando agrupá-las em grupos de nós elétricos. Cada nó elétrico recebe uma identificação única, que será utilizada na identificação da conectividade elétrica dos equipamentos.

Assim este algoritmo faz uma varredura no diagrama, localizando todos os equipamentos manobráveis e identificando os nós elétricos no qual este equipamento está conectado. O par de nós que compõe a conexão elétrica do equipamento é registrado em um próprio atributo do bloco (atributo *flag*), ficando desta forma registrada no próprio arquivo da interface gráfica. A interface gráfica gerada é mantida no formato DXF.

Para a manipulação dos arquivos no formato DXF, que atendesse as especificações iniciais do projeto, principalmente no que se refere à possibilidade de interação do usuário com os elementos manobráveis via mouse, foi escolhida a ferramenta computacional VectorDraw® [2].

Para o VectorDraw® um objeto é uma base de dados interna que representa um desenho, que contém objetos gráficos (entidades), sendo que o objeto é associado a uma janela visualização do VectorDraw®. Cada entidade está associada a um conjunto de propriedades tais como: identificador único, cor, layer, etc.

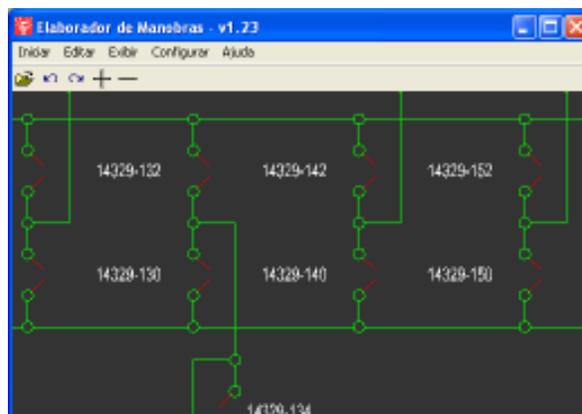


Figura 1. Interface gráfica do sistema.

## III. MODELAGEM E SIMULAÇÃO ELÉTRICA

Os modelos de simulação fornecem a resposta de um sistema a um conjunto de informações de entrada, que incluem regras de decisão, permitindo ao tomador de decisão examinar as conseqüências de diversos cenários de um sistema existente ou de um sistema em projeto [3].

A simulação tem como objetivo apresentar o comportamento discreto da subestação, tendo como variáveis de entrada os estados dos seccionadores e disjuntores (aberto / fechado e desligado / ligado), e de saída o estado dos equipamentos elétricos (energizado ou desenergizado). Sendo que os estados de saída dependem também do arranjo elétrico da subestação, pois estabelecem os possíveis caminhos do fluxo elétrico que circula entre as linhas de transmissão de entrada e saída.

Para cada manobra realizada em um equipamento há uma alteração do conjunto dos possíveis caminhos de circulação do fluxo elétrico, sendo que o algoritmo deve identificar todos os possíveis caminhos de circulação entre as linhas de transmissão de entrada e de saída.

Inicialmente foram avaliadas as opções de modelagem do sistema a partir das suas particularidades a serem abordadas na simulação. O problema proposto pode ser classificado como um problema de identificação de todos os possíveis caminhos, entre as entradas e saídas da subestação, do fluxo de corrente elétrica. Diversas teorias e estudos já foram realizados na análise de problemas de fluxo em redes (elétricas, hidráulicas, de dados, etc) como uma aplicação da Teoria dos Grafos[4]. Grafos são estruturas matemáticas, que podem ser definidas como apresentado em (1)

$$G = (X, A) \quad (1)$$

onde  $X$  é o conjunto de nós  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  e  $A$  é o conjunto de arcos  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ .

Cada arco  $a_k$  pode ser definido por um par de nós do conjunto  $X$ , isto é  $a_k = (x_i, x_j)$ . A estes arcos são associados pesos numéricos que devem ser considerados por algoritmos que visam cumprir determinada tarefa [5].

Para a modelagem da subestação foram feitas as seguintes considerações:

- Nós: barras, linhas de transmissão, linhas de interligação, primário / secundário dos transformadores, ou seja, qualquer ponto de conexão elétrica;
- Arcos: seccionadores, chaves de aterramento e disjuntores sendo que para cada arco seria associado um valor:
  - 1 – fechado / ligado
  - 0 – aberto / desligado
- Os demais equipamentos série, para efeito de conectividade, são considerados elementos passivos que interligam dois nós.

A cada manobra realizada ocorre uma alteração da topologia do grafo representativo do arranjo da subestação. A partir das informações contidas na própria interface gráfica, referentes à conectividade elétrica dos equipamentos, e do estado atual dos equipamentos é gerada uma Lista de Adjacências de representação do grafo. A Lista de Adjacência, que especifica todos os nós adjacentes a cada nó do grafo, foi escolhida como forma de representação do grafo por apresentar neste problema particular um desempenho melhor em relação a Matriz de Adjacências. A Lista de Adjacências é recomendada em tarefas em que há a necessidade de processar nós adjacentes a um nó  $x_n$  [5], e faz parte do domínio do problema a propagação do fluxo elétrico pelos nós adjacentes.

A literatura ressalta que a Matriz de Adjacências apresenta um melhor desempenho no que se refere à manutenção da mesma, quando é necessário inserir ou retirar nós, pois nesta representação basta mudar de 0 para 1 (ao inserir) ou de 1 para 0 (ao retirar). No caso do sistema desenvolvido empregando a Lista de Adjacência, não ocorreram problemas de desempenho na geração da mesma, pois a lista é gerada a partir das informações da conectividade elétrica que já existem.

A partir das linhas de transmissão que suprem a subestação (nós iniciais), seguindo o sentido da corrente, o algoritmo deverá percorrer cada um dos caminhos possíveis formados pelo conjunto dos arcos associados, sendo que os arcos de valor 0 (aberto) não serão considerados como caminhos possíveis. Em termos da Teoria dos Grafos percorrer um grafo consiste em visitar cada nó somente uma vez, e para que isso ocorra, cada nó visitado é marcado, no caso deste algoritmo somente os nós que estiverem na cadeia de adjacência do nó inicial (energizado) serão visitados e identificados (energizados).

Baseando-se no algoritmo de busca em profundidade, a partir do nó inicial será visitado um nó adjacente, segundo o caminho estabelecido pelo arco. Se um nó tiver todos os seus nós adjacentes visitados retorna-se para o nó predecessor. O percurso está terminado se este processo de visita e

retorno levar ao primeiro vértice de onde o percurso começou.

#### IV. INTERTRAVAMENTOS

A inteligência do sistema estará presente orientando o usuário quanto aos intertravamentos estabelecidos, auxiliando o planejamento do sequenciamento das manobras. Uma das formas adotadas pela CTEEP de representar as regras de intertravamento, associada a cada equipamento, é através de um diagrama lógico tendo como variáveis de entrada o estado atual dos demais equipamentos que interferem na manobra, como pode ser observado na figura abaixo:

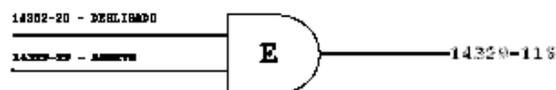


Figura 2. Representação lógica de um intertravamento.

Um dos módulos do sistema é o de supervisão de intertravamento. Este módulo é responsável pelos seguintes itens:

- Programação e edição das regras de intertravamento, através de uma interface visual, que as converte e armazena na forma de equação booleana;
- Verificação automática do cumprimento das regras durante a elaboração da manobra.

Uma regra de intertravamento é uma expressão lógica que mostra a interdependência entre os diversos equipamentos de uma subestação elétrica. Quando algum destes equipamentos precisa ser manobrado, um ou mais equipamentos precisam estar em algum tipo de estado (ligado, desligado, aberto ou fechado). Esta expressão booleana pode ser representada como um diagrama lógico como visto na figura 2. Em certos casos essas regras podem ser bastante complexas envolvendo vários equipamentos e com várias funções booleanas em cascata.

A solução proposta foi criada com o intuito de minimizar o impacto da nova interface com o usuário e ao mesmo tempo minimizar os possíveis erros que poderiam ser cometidos durante o cadastramento e manutenção das regras de intertravamento. O sistema desenvolvido fez uso da biblioteca gráfica FlowChartX Standard [6] para a representação visual dos intertravamentos, por ser bastante genérica e flexível de forma a possibilitar a criação de diagramas lógicos de qualquer nível de complexidade. Na figura 3 pode-se observar o módulo de cadastro, edição e visualização das regras de intertravamento.

O sistema foi desenvolvido com a intenção de ser, visualmente e tecnicamente o mais próximo com o padrão de documentação adotada para as regras de intertravamento das subestações. O diagrama lógico é criado pelo usuário em forma de árvore horizontal e quando o mesmo é gravado para o banco de dados é usado um algoritmo que percorre o primeiro nó da árvore e monta gradativamente uma expressão lógica equivalente. O processo inverso ocorre quando o usuário carrega uma regra de intertravamento armazenada no banco de dados. Um exemplo de uma expressão lógica pode ser vista abaixo, onde os números identificam os equipamentos, enquanto Aberto, Fechado, Ligado e Desligado sinali-

zam o estado obrigatório dos respectivos equipamentos.

**14352-45** = (14329-38/Aberto **E** 14329-236/Fechado **E** 14352-4/Desligado) **OU** (14352-8/Ligado **E** 14329-226/Fechado) **OU** (14329-138/Aberto **E** 14329-210/Fechado **E** 14329-230/Fechado)

Com estas expressões lógicas representando os diagramas de regras de intertravamento, o sistema terá as informações suficientes para que cada manobra realizada nas subestações seja devidamente validada pela regra. Caso a regra não seja atendida, a manobra será bloqueada e o usuário do sistema será informado de quais equipamentos violam as condições de manobra.

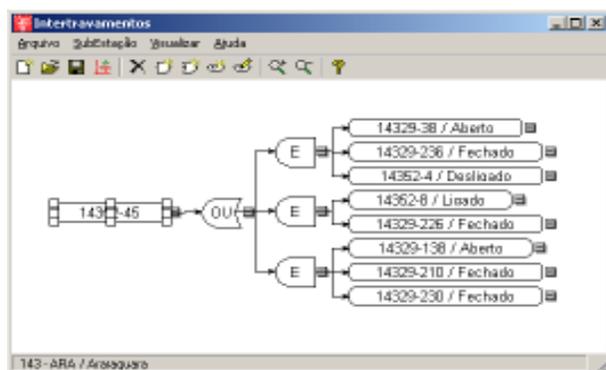


Figura 3. Módulo de intertravamento

## V. ELABORAÇÃO DA MANOBRA

O Programa de Manobras pode ser definido como o documento que contém o conjunto de tarefas que devem ser executadas para que uma condição de impedimento seja atendida. Neste conjunto de tarefas constam também todas as ações necessárias para a liberação e normalização de equipamentos ou instalações. A condição de impedimento, que deve ser atendida nestas tarefas, pode ser definida como estado no qual o equipamento / instalação deve permanecer durante o período de realização dos serviços (de manutenção e/ou ensaios).

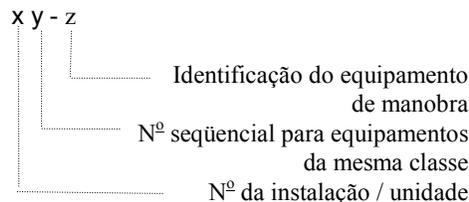
Atualmente a CTEEP elabora e digita manualmente os Programas de Manobras que são inseridos no sistema PIO (Programa de Impedimento Operativo). Desta forma, a etapa de elaboração da seqüência de manobras está sujeita a uma falha humana seja ela de natureza técnica ou de digitação.

É importante salientar que as condições de impedimento só podem ser obtidas se as ações forem executadas exatamente como previstas no Programa de Manobras. Em outras palavras, a seqüência de ações definida previamente deve ser obedecida para que a conclusão da operação, como um todo, possa ser obtida com sucesso.

A redação do Programa de Manobras segue estruturas diretas e imperativas, contendo comandos positivos, tais como “DESLIGAR 14352-46” ou “DESBLOQUEAR R-79 DO 14352-21”. A seqüência dos comandos é estabelecida seguindo critérios de proximidade física, bem como as regras de intertravamento.

Primeiramente foi feita uma análise da estrutura dos comandos para a criação de um recurso de automatismo na elaboração do Programa de Manobras, integrado com a interface gráfica:

- Todos os equipamentos de manobra existentes nas subestações e linhas de transmissão da CTEEP são identificados através de um código numérico, que deve ser respeitado na formulação do Programa de Manobras, com a seguinte padronização:



Ex.:

ARA: DESLIGAR 14352-45

- 143:** número da instalação de Araraquara;
- 52:** número de identificação do equipamento, no caso disjuntor de linha;
- 45:** número de identificação única do disjuntor na instalação de Araraquara.

Seguindo a padronização de identificação dos equipamentos, é possível identificar o tipo do equipamento (disjuntor, seccionador, etc). Como as identificações estão registradas nos próprios blocos dos diagramas da interface gráfica, o usuário ao manobrar um equipamento pela interface o sistema consegue identificar qual bloco (equipamento) foi selecionado e apresentar ao usuário as opções de ação a serem executadas para o tipo específico de equipamento (figura 4).

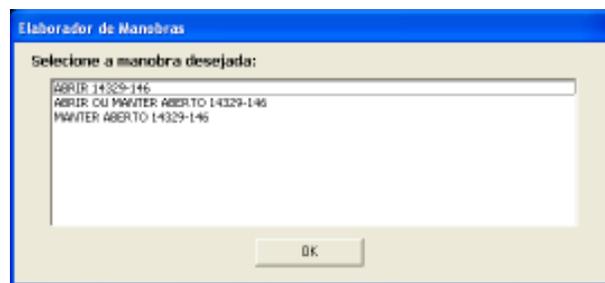


Figura 4. Interface de seleção da manobra.

A partir do momento em que uma das opções é selecionada, a manobra escolhida é registrada na tela de elaboração do Programa de Manobras (figura 5). Nesta tela, comentários adicionais podem ser acrescentados, e quando finalizada pode ser diretamente enviada ao sistema PIO.



Figura 5. Interface de elaboração da manobra.

## VI. INTEGRAÇÃO DOS SISTEMAS

O Sistema de Supervisão e Controle (SSC/SSA) da CTEEP utiliza para sua base de dados histórica o sistema PI, sistema historiador desenvolvido pela empresa americana OSI Software [7]. O acesso ao historiador permite ao sistema a coleta das informações de estado dos equipamentos manobráveis da subestação no momento em que for elaborado o Programa de Manobras. A OSI Software disponibiliza o PI Application Programming Interface (API), que é uma biblioteca voltada ao desenvolvimento de aplicativos em Visual Basic para a recuperação e apresentação dos dados armazenados [8].

A API do historiador é dividida em unidades, destas unidades será utilizada a unidade Snapshot Functions que permite a recuperação dos estados mais recentes dos equipamentos manobráveis da subestação. Será utilizada a unidade Point Database Functions de identificação e busca das instalações de onde serão extraídas as informações. Este historiador além de informar o estado dos equipamentos estará informando o status da comunicação de dados, bem como das ações associadas aos equipamentos.

Como produto final do sistema teremos um texto contendo o Programa de Manobras, que será inserido por meio de comandos SQL (Structured Query Language) na base de dados do sistema PIO. O sistema PIO já é responsável por todo o gerenciamento do workflow das manobras, desde a solicitação de impedimento, elaboração, aprovação por parte das hierarquias e despacho para as áreas de execução e acompanhamento.

A integração da ferramenta desenvolvida aos sistemas legados da CTEEP é transparente não impactando na necessidade de alterações nas interfaces (figura 6).



Figura 6. Integração dos sistemas

## VII. CONCLUSÕES

Procurou-se neste artigo realizar uma exposição das funcionalidades básicas do Sistema Elaborador de Sequenciamento de Manobras que abrangesse as principais características, bem como expor as soluções técnicas para os principais desafios do projeto, como por exemplo, a interface gráfica do sistema, simulação elétrica do arranjo da subestação e o registro e processamento das regras de intertravamento. Estas soluções sempre tiveram como objetivo minimizar o tempo destinado à administração e manutenção do sistema, de uma maneira flexível, que se ajuste facilmente a qualquer subestação. Observou-se que um sistema que auxilie a elaboração do Programa de Manobras, com uma interface gráfica incorpora grandes vantagens ao processo, facilitando a tomada de decisão, aumentando a segurança e reduzindo o tempo despendido na sua elaboração. O sistema também pode ser utilizado para treinamento dos operadores e contribui, dessa maneira, para uma melhor execução da seqüência de manobras. Do ponto de vista metodológico o algoritmo para a obtenção das conectividades elétricas, associado à extração dos grafos a partir de diagramas unifilares em formato DXF abre uma série de novas aplicações, a partir de um documento que já é comumente utilizado tanto pela engenharia, quanto pela manutenção e operação.

## VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Autodesk *Autocad 2002 - DXF Reference Guide*, 2001 [Online]. Disponível: <http://www.autodesk.com/techpubs/autocad/dxf/dxf2002.pdf>
- [2] Home-page da Empresa VectorDraw. <http://www.vdraw.com/> Data de acesso: 20/06/2006
- [3] L.F.G. Soares, *Modelagem e simulação discreta de sistemas*, Ed. Campus, 1992, São Paulo.
- [4] R. Diestel, *Graph Theory*, New York:Wiley, 2005
- [5] A. Drozdek, *Estrutura de dados e algoritmos em C++*, Ed. Pioneira, 2002, São Paulo.
- [6] Home-page da Empresa Mindfusion. <http://www.mindfusion.org/> Data de acesso: 20/06/2006
- [7] Home-page da Empresa OSI Software. <http://www.osisoft.com/> Data de acesso: 20/06/2006
- [8] OSI Software. *PI Application Programming Interface*, Outubro 1996.