

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

SISTEMATIZAÇÃO DA MODELAGEM NO PROJETO DE SISTEMAS
MECATRÔNICOS EXEMPLIFICADA NA AUTOMAÇÃO DE CENTRAIS
HIDRELÉTRICAS

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA
MECÂNICA

FRED HENRIQUE SOUZA PAES

Florianópolis, novembro de 2001.

**SISTEMATIZAÇÃO DA MODELAGEM NO PROJETO DE SISTEMAS
MECATRÔNICOS EXEMPLIFICADA NA AUTOMAÇÃO DE CENTRAIS
HIDRELÉTRICAS**

FRED HENRIQUE SOUZA PAES

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE**

MESTE EM ENGENHARIA

**ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA SENDO APROVADA EM SUA
FORMA FINAL**

Prof. Víctor Juliano De Negri, Dr. Eng. – Orientador

Prof. Júlio César Passos, Dr. Eng. – Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA

Prof. André Ogliari, Dr. Eng.

Prof. Carlos Alberto Martin, Dr.-Ing. Eng.

Prof. Rômulo Silva de Oliveira, Dr. Eng.

Eng. João Marcos Castro Soares, M. Sc.

**“Sonhar é manter-se acordado”
Fred Paes**

**À Família.
Aos meus pais: Dona Tina e Seu Eron.**

Resumo

Título: Sistematização da Modelagem no Projeto de Sistemas Mecatrônicos exemplificada na Automação de Centrais Hidrelétricas

Com o avanço tecnológico é natural e inevitável que diferentes áreas do conhecimento unam suas características mais positivas e convirjam interesses para alcançar objetivos comuns, pois os desafios também crescem em volume e complexidade de mesma proporção. Em especial, a Teoria da Informação, a Eletrônica e a Mecânica, através da Mecatrônica, que se vale destas premissas para projetar seus Produtos e Sistemas. Entretanto, para que haja uma integração harmônica e sinérgica é imprescindível que as fronteiras entre cada um destes universos multitecnológicos sejam bem estabelecidas. É imperioso estratégias de projeto que empreguem métodos e linguagens compreensíveis por profissionais de diferentes perfis para que interajam mais facilmente. Nesta perspectiva, o presente trabalho contribui ao sistematizar as atividades de Projeto de automação industrial na fase Conceitual, documentando cada uma destas atividades utilizando diagramas conhecidos no ambiente da indústria, como o Grafcet e outros familiares na área acadêmica, a exemplo das Redes de Petri C/A e programação Orientada a Objeto com UML. Através de um conjunto de diagramas - construídos utilizando ferramenta de software comercial (VISIO) -, é possível mapear as decisões tomadas na Concepção do projeto até a fase de Projeto Detalhado, de forma a prever, rápida e precisamente, as conseqüências e impactos relacionados a tais escolhas, revendo-as e alterando-as imediatamente, se necessário.

Para comprovar a aplicabilidade e eficiência da sistematização, foi modelado o projeto de automatização de uma Central Hidrelétrica, a partir das suas partes estruturais e físicas e as interligações entre os subsistemas que a compõem. E, para a parte comportamental, foi desenvolvido o software que comanda parte do funcionamento da usina. Assim, com a sistematização é possível substituir uma documentação construída a partir de registros fotográficos, especificações técnicas genéricas, esquemáticos específicos e da heurística dos profissionais, por uma científica, mas que leva em consideração os diferentes perfis dos envolvidos e suas contribuições particulares.

Palavras-chave: Mecatrônica, PCH, Automação, Grafcet, Metodologia de projeto, UML/C++.

ABSTRACT

Title: Modeling Systematization in the Design of Mechatronics Systems using as example the Automation of Hydraulic Power Plants

With the technological progress, it is natural and inevitable that different areas of knowledge put together their positive characteristics and merge interests to reach common goals, since the volume and complexity of challenges increase by the same proportion. This is specially true for the Theory of Information, Electronics and Mechanics, by means of Mechatronics, that use these assumptions to develop Products and Systems. However, in order to reach harmonic and synergic integration, it is essential to clearly establish the borders between these multi-technology universes. Project strategies using methods and languages that can be understood by professionals with different profiles are mandatory to allow an easier interaction. From this point of view, the contribution of this work is to systematize the activities of industrial automation projects in the Conceptual phase, documenting each of these activities with diagrams known to the industry environment, such as Grafcet, and others which are familiar to the academic area, e.g. Petri C/A Networks and Object-Oriented programming with UML. By means of a group of diagrams - built using a commercial software tool (VISIO) - it is possible to map decisions taken from the Project Conception to the Detailed Project phase, in order to fast and accurately foresee consequences and impacts related to such choices, reviewing them and making changes, if required.

To prove the applicability and efficiency of the systemization, the automation project for a Hydraulic Power Plant had been modeled from the structural and physical parts and the interconnection between its subsystems. And, for the behavioral part, a software program to command part of the plant operation was developed. Thus, the systemization allows to replace the documentation made up of photographic records, general technical specifications, specific schematics and professionals' heuristics, with a scientific documentation, which takes into account the different profiles of those involved and their particular contributions.

Key-Words: Mechatronics, Hydraulic Power Plant, Automation, Grafcet, Project Methodology, UML/C++.

I – INTRODUÇÃO

| | |
|---|----|
| 1.1 APRESENTAÇÃO..... | 11 |
| 1.2 APLICABILIDADE DOS MÉTODOS DE PROJETO NA INDÚSTRIA | 11 |
| 1.3 CONCEITOS BÁSICOS DE MECATRÔNICA | 13 |
| 1.4 DIFERENCIAÇÃO ENTRE PRODUTOS E SISTEMAS MECATRÔNICOS | 15 |
| 1.5 PROBLEMAS NA ABORDAGEM SISTÊMICA EM PROJETOS MECATRÔNICOS | 15 |
| 1.6 OBJETIVOS DO TRABALHO | 16 |
| 1.7 CONTEÚDO DA DISSERTAÇÃO..... | 17 |

II - PANORAMA DO SETOR ELÉTRICO E MOTIVAÇÃO PARA MODERNIZAÇÃO DE PCH

| | |
|--|----|
| 2.0 INTRODUÇÃO..... | 19 |
| 2.1 REGULAMENTAÇÃO DOS CRITÉRIOS QUE DEFINEM PCH | 20 |
| 2.1.1 Panoramas Regionais..... | 21 |
| 2.2 MOTIVAÇÃO PARA MODERNIZAÇÃO DE PCH..... | 23 |
| 2.2.1 Alternativas de Automação..... | 23 |

III - MÉTODOS E FERRAMENTAS

| | |
|--|----|
| 3.1 REDE DE PETRI CANAL/AGÊNCIA..... | 28 |
| 3.1.1 Regras de Refinamento e Condensação..... | 29 |
| 3.2 GRAFCET | 30 |
| 3.2.1 Elementos do Grafcet | 31 |
| 3.3 UML..... | 34 |
| 3.3.1 Conceitos Básicos de OO | 34 |
| 3.3.2 Definições da UML | 35 |

IV – SISTEMATIZAÇÃO DA MODELAGEM DO PROJETO DE SISTEMAS MECATRÔNICOS

| | |
|---|----|
| 4.1 - INTRODUÇÃO | 40 |
| 4.2 – SISTEMATIZAÇÃO DE MODELAGEM EXISTENTE NA LITERATURA | 40 |
| 4.3 SISTEMATIZAÇÃO PROPOSTA PARA SISTEMAS MECATRÔNICOS | 49 |

V - DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS FÍSICOS DA PCH

| | |
|--|----|
| 5.0 EQUIPAMENTOS HIDROMECAÂNICOS NAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS..... | 55 |
| 5.1 TURBINAS HIDRÁULICAS | 56 |
| 5.1.1 Turbinas Francis | 57 |
| 5.1.2 Turbinas Axiais | 62 |
| 5.1.3 Turbinas Pelton..... | 64 |
| 5.2 CRITÉRIOS PRELIMINARES PARA ESCOLHA DO TIPO DE TURBINA | 66 |
| 5.2.1 Regulação | 67 |

VI – MODELAGEM DA PCH HERVAL

| | |
|--|----|
| 6.1 AUTOMAÇÃO, TELECOMANDO E MODERNIZAÇÃO DA PCH HERVAL..... | 70 |
| 6.2 CARACTERÍSTICAS DA USINA..... | 71 |

| | |
|--|-----|
| 6.3 MODELAGEM FUNCIONAL/ESTRUTURAL E COMPORTAMENTAL | 71 |
| 6.3.1 Aquisição do Conhecimento..... | 72 |
| 6.3.2 Identificação e apresentação dos Subsistemas que compõem a Usina | 72 |
| 6.3.3 Modelagem do Fluxo de Energia/Matéria | 76 |
| 6.3.4 - Modelagem do Fluxo de Informação | 84 |
| 6.4 MAPEAMENTO DOS SUBSISTEMAS DE COORDENAÇÃO EM SOFTWARE ORIENTADO A OBJETOS | 96 |
| 6.4 Implementação do Código..... | 110 |

VII - CONCLUSÃO

| | |
|---|-----|
| 7.0 – VISÃO GERAL DO TRABALHO | 116 |
| 7.1 – RESULTADOS ALCANÇADOS | 116 |
| 7.2 – PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS | 117 |

| | |
|---------------------------------------|-----|
| VIII-REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 128 |
|---------------------------------------|-----|

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|-----|
| Figura 1.1 - Evolução das tecnologias ao longo dos tempos (KAJITANI, 1999). | 14 |
| Figura 1.2 - As cinco funções básicas dos Sistemas Mecatrônicos (KAJITANI, 1999). | 14 |
| Figura 2.1 – Distribuição geográfica das PCH's no território brasileiro (ANEEL, 2001). | 21 |
| Figura 2.2 - Diagrama de blocos do grupo Turbina-Gerador genérico. | 24 |
| Figura 2.3 - Automação parcial | 25 |
| Figura 2.4 - Automação completa | 26 |
| Figura 3.1 – Mecanismo de refinamento e condensação de redes C/A (DE NEGRI, 1997). | 30 |
| Figura 3.2 - Elementos básicos do Grafcet | 32 |
| Figura 3.3 - Modo procedural para Grafcet e ação <i>stand alone</i> . | 33 |
| Figura 3.4 – Elementos do diagrama de Caso de Uso | 37 |
| Figura 3.5 – Classe e seus elementos. | 37 |
| Figura 3.6 – Diagrama de Sequência. | 38 |
| Figura 4.1 - Estrutura de metodologia (SHAKERI, 1998). | 40 |
| Figura 4.2 – Esquema de um dispositivo de geração (WHITTAKER et al., 1995). | 41 |
| Figura 4.3 - Procedimento para o projeto (WHITTAKER et al., 1995). | 42 |
| Figura 4.4 - Inter-relacionamento e hierarquia dos F-elements e os W-elements (LIPPOLD, 1999). | 43 |
| Figura 4.5 - Atividades e sub-atividades no TMM (SHAKERI, 1998). | 44 |
| Figura 4.6 - As atividades e seus resultados (SHAKERI, 1998). | 45 |
| Figura 4.7 – Modelo funcional do processo de projeto para Sist. Automáticos (FURST, 2001). | 46 |
| Figura 4.8 - Processo de projeto, detalhes de implementação (DE NEGRI, 2001). | 46 |
| Figura 4.9 – Atividades do projeto Conceitual | 48 |
| Figura 4.10 – Fluxograma das atividades do projeto Conceitual para Sistemas Mecatrônicos. | 49 |
| Figura 4.11. - Modelo funcional/estrutural geral e refinado de sistema automático (DE NEGRI, 1996). | 51 |
| Figura 4.12 – Encaminhamento da sistematização do Sistema Energia/Matéria. | 52 |
| Figura 4.13 - Encaminhamento da sistematização do Sistema de Informação em: Rede C/A, Grafcet, Diagramas de Caso de Uso, de Sequência e de Classe e Código. | 54 |
| Figura 5.1 - Vista em corte de central hidrelétrica que usa turbina Francis (ITAIPU, 1998). | 56 |
| Figura 5.2 - Turbina Francis disposta verticalmente (LITTLER, 1996). | 58 |
| Figura 5.3 - Vista explodida de turbina Francis de grande porte (ITAIPU, 2001). | 59 |
| Figura 5.4 - Rede C/A genérica de usina usando Turbina Francis | 62 |
| Figura 5.6 - Rede C/A genérica de usina que utiliza Turbina Kaplan. | 64 |
| Figura 5.7 - Corte transversal de turbina Pelton de dois jatos (MACINTYRE, 1983). | 65 |
| Figura 5.8. Rede C/A geral de usina com turbina Pelton. | 66 |
| Figura 5.9 – Curvas de rendimento ($\eta_i/\eta_{iMÁX}$) em função da vazão ($Q/Q_{iMÁX}$) para a rotação n_o e altura de queda H_o constantes. Hélice-1, Kaplan-2, Francis rápida-3, Francis lenta-4, Pelton-5 (TENOT, 1932 citado por VIANA e ALENCAR, 1998). | 68 |
| Figura 6.1 – Barragem com grade de proteção submersa | 73 |
| Figura 6.2 - Percorso do duto forçado em direção à usina. | 73 |
| Figura 6.3 - Vista externa da Casa de Força da usina, em detalhe o duto de adução. | 74 |
| Figura 6.4 - Detalhe do duto de adução dividindo-se em dois, levando água às duas turbinas. | 74 |
| Figura 6.5 - Detalhes principais da turbina. | 75 |
| Figura 6.6 - Detalhes de equipamentos na Casa de Força | 76 |
| Figura 6.8 - Rede C/A geral da Usina de Herval | 79 |
| Figura 6.9 - Refinamentos das agências: válvula principal e <i>bypass</i> e anel distribuidor. | 81 |
| Figura 6.10 - Refinamento das agências: Roda dentada e Gerador. | 82 |
| Figura 6.11 - Refinamento das agências dos mancais combinados. | 83 |
| Figura 6.12 - Refinamento da agência mancal combinado, usando diagrama de circuito hidráulico. | 84 |
| Figura 6.14 - Rede C/A de Supervisão – Ligação entre os Coordenadores dentro da CPU (RTVX). | 88 |
| Figura 6.15 - Grafcet Coordenador Geral | 91 |
| Figura 6.16 - Grafcet do Coordenador de Partida | 92 |
| Figura 6.17 – Grafcet do Coordenador de Parada | 93 |
| Figura 6.18 - Grafcet do Coordenador de Excitação | 94 |
| Figura 6.19 - Grafcet Coordenador de Desexcitação | 95 |
| Figura 6.29 – Interface que simula as entradas para o sistema que comanda o funcionamento da usina. | 112 |
| Figura 6.30 – Parte do código fonte (.cpp) da implementação do coordGeral. | 114 |
| Figura 6.31 – Parte do código fonte (.h) da implementação do coordGeral. | 114 |
| Figura 6.21 – Esquemático Elétrico das Interligações entre Módulos Eletrônicos do Regulador (REIVAX, 2000). | 99 |

TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1 – Distribuição da potência instalada no Brasil (ANEEL, 2001). | 22 |
| Tabela 2.2 - Previsão, por região, da potência a ser instalada nas PCH's (ANEEL, 2001)..... | 22 |
| Tabela 3.1 – Rede de Petri Canal/Agência – Elementos básicos (DE NEGRI, 1997)..... | 29 |
| Tabela 4.1 – Subdivisão do projeto de sistemas automáticos (DE NEGRI, 1996)..... | 47 |

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

A necessidade em alcançar elevados níveis de qualificação e padronização tem levado as empresas dos setores industriais e de serviços a considerarem a automação de seus processos como algo imprescindível. Do ponto de vista tecnológico, a automação beneficia-se com o incremento da integração multi-tecnológica e sinérgica das áreas **Elétrica, Mecânica e Informática** que caracterizam o projeto **Mecatrônico**. Esta sinergia manifesta-se por meio da integração e compatibilização destes três universos e não apenas do somatório das suas partes. Estas características dos sistemas automáticos impõem a necessidade de aplicação de metodologias e ferramentas de projeto que contemplem o caráter multidisciplinar dos princípios operacionais e construtivos. Entretanto, a utilização integrada das diversas ferramentas de modelagem constitui-se um problema quando se objetiva a sistematização da atividade de projeto.

Para ter um diferencial e sobressair-se em relação à concorrência, as empresas precisam ser eficazes e eficientes no desenvolvimento de seus projetos de **Produtos** ou **Sistemas**. Eficácia no sentido de documentar todos os subsistemas existentes, das interligações entre estes e das influências e abrangências que cada um tem em relação ao outro, para que seja possível prever as conseqüências de decisões assumidas na fase inicial do projeto. Eficiência para que a documentação seja formada por diagramas e métodos compreensíveis por todos os envolvidos no projeto e, ainda, que seja clara e reutilizável.

Com o avanço da área de software, foram criadas ferramentas computacionais que dão suporte ao desenvolvimento de sistemas, sejam estes também de software ou sistemas técnicos em geral. Desta forma, devem-se aproveitar as facilidades e potencialidades proporcionadas por estes instrumentos, pois o ganho em tempo e qualidade faz a diferença entre empresas concorrentes.

1.2 APLICABILIDADE DOS MÉTODOS DE PROJETO NA INDÚSTRIA

Embora seja subjetiva, é possível comprovar a distância que separa a sociedade civil da universidade, pois há um preconceito mútuo. Inúmeros são os fatores que corroboram para isto, entre os quais se destacam: 1) A universidade, de uma maneira geral, não é

comprometida em responder as carências da sociedade; 2) Parte dos pesquisadores está preocupada em apenas satisfazer o seu ego e aos órgãos de fomento, através de publicações internacionais as quais, em muitos casos, solucionam problemas em países mais desenvolvidos; 3) A comunidade acadêmica apática e de braços cruzados, assiste a falta de financiamento para pesquisa, ensino e extensão, esticando os braços implorando recursos da iniciativa privada, em um verdadeiro salve-se-quem-puder; 4) O descompasso entre a pesquisa e o ensino de graduação, pois são os graduados os agentes formadores de opinião que poderão fazer a ligação entre academia e empresa.

O distanciamento entre universidades e empresas não ocorre apenas no Brasil, isto também acontece em outras partes do mundo, com maior ou menor intensidade. Entretanto, cabe ressaltar, no Brasil existe uma firme campanha governamental, cujo propósito é desgastar a imagem das universidades públicas frente à população e distanciá-la cada vez mais da sociedade e suas demandas - mesmo sendo estas as que realizam efetivamente a pesquisa no País - para em seguida privatizá-las.

Os reflexos negativos da má relação universidade-indústria nacional são claros. Estes efeitos induzem, muitas vezes, o setor produtivo buscar soluções prontas (caixas-pretas) em empresas estrangeiras, gerando empregos e divisas nos países de origem. Entre outros, este fato produz desconfianças mútuas entre acadêmicos e empresários, criando um ambiente de descrédito entre aqueles que deveriam ser parceiros.

Neste cenário, é compreensível que a utilização de técnicas e procedimentos elaborados na academia sejam vistos com ceticismo no entorno industrial. Particularizando esta análise para o contexto da mecatrônica, vê-se que é mínimo o emprego de metodologias para projeto de sistemas ou produtos mecatrônicos na indústria. GOUVINHAS et al (1999) apresenta, através de levantamentos de campo com projetistas do meio industrial, as razões para este problema e aponta possíveis soluções.

Entre as causas, tem-se que: os métodos de projeto:

- Não são bem compreendidos pelos projetistas;
- Inibem a criatividade dos projetistas;
- São lentos para a dinâmica do processo de projeto, que exige sempre prazos mínimos
- Não são percebidos como proveitosos para o trabalho diário do projetista;
- Não oferecem benefícios claros e imediatos;

Em geral, os projetistas acreditam que a sua experiência prática são mais úteis que a aplicação estrita de métodos científicos.

Segundo o autor, os seguintes pontos devem ser focados a fim de mudar esta situação. Os métodos para projetos devem ser:

- Feitos sob medida para as necessidades específicas de cada empresa;
- Empregados depois de ter havido um programa de treinamento que leve em consideração que os exercícios de aprendizagem devem ser graduais e que necessitam de tempo para serem assimilados adequadamente;
- Apoiados incondicionalmente pela diretoria da empresa;
- Fundamentados nos princípios da engenharia simultânea.

Como visto, há diferentes origens para a não utilização das metodologias para projetos. O primeiro grupo de causas é filosófico, cuja solução exige mudanças a partir da conscientização e disputa política entre as classes dominantes e dominadas do País. O segundo grupo, abordadas por GOUVINHAS (1999), são técnicas. Na perspectiva de estimular e possibilitar a utilização de métodos de projetos pela indústria é que esta dissertação busca contribuir.

Este trabalho está inserido em um projeto de pesquisa desenvolvido em parceria entre o LASHIP – Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC e a empresa Reivax Automação e Controle Ltda.

1. 3 CONCEITOS BÁSICOS DE MECATRÔNICA

Segundo HILDRE e AASLAND (1996), não existe uma definição de mecatrônica aceita universalmente, pois, por envolver profissionais de áreas diferentes, possibilita certa divagação, resultando no uso do termo em muitos contextos. Assim, é importante ter claro, de antemão, o enfoque de cada trabalho especificamente.

Neste universo onde se integram três tecnologias não há apenas diferenças técnicas, mas também da natureza das necessidades e dos problemas em cada uma particularmente. BUUR (1990) faz uma comparação sistemática estabelecendo a diferença entre sistema mecatrônico e sistema puramente mecânico e sistema mecatrônico e puramente de TI¹.

Historicamente a humanidade fez revoluções no sentido de melhor aproveitar os recursos disponíveis de matéria, energia e informação, transformando-os em itens para sua sobrevivência e conforto. Sendo matéria e energia limitadas na natureza, o desafio é utilizar a informação para explorar estes recursos de maneira racional. É neste contexto que a mecatrônica se enquadra ao integrar diversas áreas do conhecimento humano, explorando os recursos de Energia e Matéria através da Informação de maneira ótima.

¹ TI (Tecnologia da Informação) = Eletrônica + Informática (software)

A mecatrônica advém da evolução natural de cada uma das tecnologias que a compõe. Iniciando com a mecânica, dos métodos mais primitivos, como a roda d'água, passando pela elétrica e compondo-se com os modernos e interativos softwares, em momentos históricos distintos, como mostrado na Figura 1.1, onde: 1 –Tecnologia da Informação; 2 – Tecnologia Mecânica e 3 – Tecnologia Eletrônica.

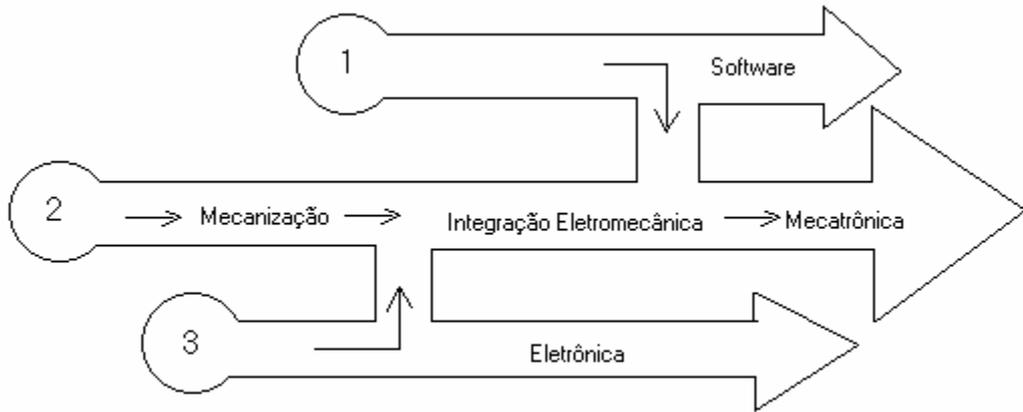


Figura 1.1 - Evolução das tecnologias ao longo dos tempos (KAJITANI, 1999).

Existem similaridades entre os sistemas mecatrônicos e os sentidos do ser humano: O computador corresponde ao cérebro, os sensores aos cinco sentidos, os atuadores aos músculos, o mecanismo ao esqueleto e a fonte de potência/energia ao metabolismo. O objetivo da mecatrônica é balancear adequadamente cada um destes elementos. Na Figura 1.2 têm-se as funções básicas dos SM, onde as linhas fazem as conexões entre os sistemas.

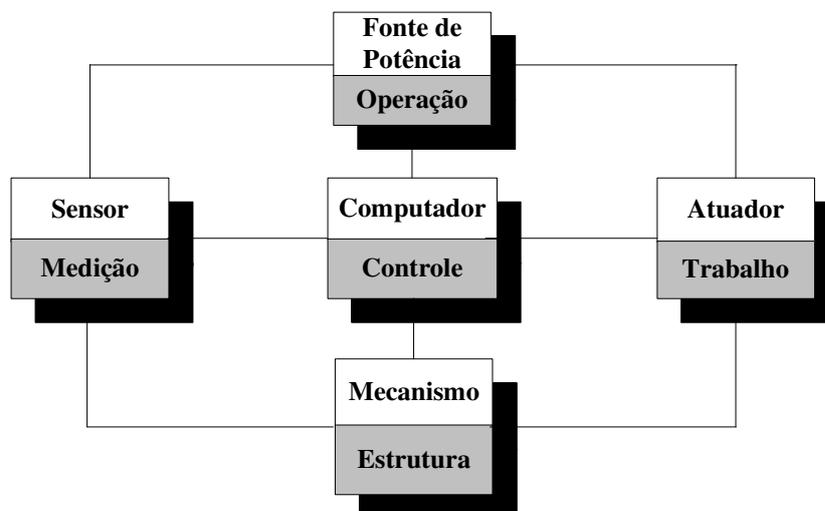


Figura 1.2 - As cinco funções básicas dos Sistemas Mecatrônicos (KAJITANI, 1999).

1.4 DIFERENCIAÇÃO ENTRE PRODUTOS E SISTEMAS MECATRÔNICOS

O emprego da palavra Mecatrônica pode estar associado a Produtos ou Sistemas. O desenvolvimento de um produto, a depender da complexidade e particularidades, pode ser considerado um sistema (ou processo). O trabalho de AARNIO (2001) formaliza estes conceitos, dividindo a mecatrônica em três níveis: Dispositivos, Máquinas e Sistemas. Ressaltando que em Sistema Mecatrônico podem existir vários produtos e dispositivos mecatrônicos. Contrariando esta abordagem, VALÁSEK (1998) diz tacitamente que Sistemas são máquinas e produtos.

Os termos produto e sistema confundem-se na literatura, em ambientes industriais e também em trabalhos científicos. Um exemplo desta ambigüidade no campo acadêmico é visto em SHAKERI (1998), cujo título do trabalho utiliza o termo Sistemas e o estudo de caso da tese é o projeto de um tocador de CD, portanto um produto.

KALJAS (1998), diz: *“analisando, nos últimos 2 a 3 anos, as publicações em conferências de mecatrônica e também em pesquisas em base de dados de biblioteca, observou-se a seguinte subdivisão em:*

- *Controle e aplicações (22%);*
- *Automação da produção (19%);*
- *Veículos autônomos guiados (15 %)*
- *Modelagem de sistemas para simulação (8%);*
- *Visão artificial (5%);*
- ***PROJETO DE SISTEMAS (4%);***
- *Educação mecatrônica (2%).”*

Como visto, há dificuldades em obter na literatura trabalhos que abordem Sistemas Mecatrônicos na forma tratada nesta dissertação.

1.5 PROBLEMAS NA ABORDAGEM SISTÊMICA EM PROJETOS MECATRÔNCIOS

Os poucos trabalhos na área de metodologia para projeto de Sistemas Mecatrônicos têm sido estritamente teóricos sem trazer uma aplicabilidade imediata. Um típico exemplo é o trabalho de HUSSEIN (2000).

A tarefa de projetar sistemas ou produtos mecatrônicos seria simples se metodologias de projeto de cada um dos subsistemas (Elétrico, Mecânico e Informático) pudessem ser integrados diretamente. Infelizmente isto não é possível, embora uma boa parte dos projetistas insista em fazê-lo. Portanto, é necessário desenvolver uma metodologia que integre estes subsistemas e não suas metodologias particulares (KALJAS, 1998). Adicionalmente, é imprescindível que haja sinergia desde as fases iniciais e desenvolva-se naturalmente ao longo do projeto.

Atualmente os projetos de Sistemas Mecatrônicos são realizados contando com a heurística dos profissionais envolvidos. O mais importante tem sido a experiência em projetos anteriores e o know-how da empresa que irão executá-los. Em geral, após ler a especificação técnica – não raro, pouco clara - o engenheiro de maior experiência visita e conhece o sistema a ser automatizado, verifica os requisitos de projeto, faz algumas anotações, volta ao escritório e começa a projetar. O próximo passo é separar o que corresponde às partes elétrica, mecânica e informática, reunir as equipes para atribuir responsabilidades e estipular prazos. A interação e troca de informação entre os membros dá-se separadamente e normalmente aos pares: Os profissionais de mecânica conversam com os de elétrica, sem a presença de um membro da informática e assim sucessivamente.

Particularizando para o projeto de automação de Pequenas Centrais Hidroelétricas², verifica-se que este procedimento também é aplicado, principalmente porque estes projetos têm alto grau de semelhança um com os outros. Assim, a figura do “engenheiro experiente” ganha importância.

No entanto, como as questões de tempo e exatidão são variáveis cada vez mais relevantes no desenvolvimento do projeto e funcionamento da planta, é necessário que haja uma organização na troca de informação entre os profissionais, no sentido de tornar as decisões e implementações necessárias compatíveis com o cumprimento dos requisitos no prazo adequado.

1.6 OBJETIVOS DO TRABALHO

Esta dissertação visa criar uma Sistematização das atividades na fase Conceitual ou de Concepção no projeto de automação de Sistemas Mecatrônicos. Esta sistemática deve permitir ao projetista identificar e documentar adequadamente tais atividades. Os diagramas assim constituídos propiciarão visualizar as influências e conseqüências que decisões tomadas nesta

² Hidroelétrica é a forma variante de hidrelétrica (SACCONI, 1998).

fase ao afetarem outras fases, em especial, na de projeto detalhado onde ocorrerão as implementações. Para tanto são necessário:

- Diagramas consistentes e relacionados entre si, representando as diversas tecnologias empregadas no projeto;
- Diagramas que documentam o projeto sejam de compreensão fácil para profissionais de diferentes perfis;
- Apresentar uma visão hierarquizada do sistema e seus desdobramentos;
- Utilizar métodos familiares no ambiente industrial;
- Empregar ferramenta comercial de software para o projeto em todas as suas fases;
- Possibilitar a reutilização de experiências anteriores;
- Possibilitar uma documentação prática que facilite as decisões da empresa cliente a respeito da abrangência propiciando uma visão geral do sistema, de quantos e quais componentes serão atingidos e da tecnologia empregada em um reprojeto para automatização.

Com o propósito de verificar a aplicabilidade do trabalho desenvolvido, será realizada a sistematização da automação da PCH de Herval, localizada em Santa Maria do Herval – RS. O trabalho de dissertação contou com a parceria da Reivax Automação e Controle Industrial Ltda., que disponibilizou parte significativa da documentação utilizada para a modernização realizada no ano 2000. Esta parceria foi viabilizada através do projeto PADCT³ no Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos - LASHIP, local onde o trabalho foi desenvolvido. A área de atuação da empresa é na venda de produtos e execução da automatização de Centrais Hidroelétricas, entre outras.

1.7 CONTEÚDO DA DISSERTAÇÃO

No primeiro capítulo destacam-se os problemas que envolvem a renúncia dos métodos de projeto por parte da indústria e sinaliza como estas dificuldades podem ser superadas. Em seguida, apresenta conceitos da engenharia mecatrônica que serão utilizados ao longo da dissertação.

No capítulo 2 é mostrado um panorama do setor elétrico nacional, com ênfase nas Pequenas Centrais hidrelétricas (PCH's). São também apresentadas as motivações para desenvolver uma sistemática de projeto para a automatização das PCH's.

³ PADCT - Programa de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico

No capítulo 3 são apresentados conceitos e exemplos dos métodos e ferramentas empregadas na sistematização proposta no trabalho.

No capítulo quadro é feita uma revisão bibliográfica das metodologias e sistemáticas para projeto de sistemas mecatrônicos existentes. Em seguida, apresenta-se a proposta de sistematização que é o foco desta dissertação, bem como as diferenças e similaridades com as existentes e os ganhos que esta apresenta.

No quinto capítulo são apresentados os sistemas físicos que fazem parte da PCH e as diferenças de configurações existentes.

No capítulo 6 é feita a Sistematização do processo de automação de uma PCH específica, empregando os conceitos e os métodos apresentados nos capítulos anteriores.

No capítulo 7, são mostradas as conclusões obtidas com a sistematização proposta, bem como as contribuições alcançadas por esta e as sugestões para trabalhos futuros.

Por último, no capítulo 8, têm-se as referências bibliográficas.

CAPÍTULO II

PANORAMA DO SETOR ELÉTRICO E MOTIVAÇÃO PARA MODERNIZAÇÃO DE PCH

2.0 INTRODUÇÃO

As crises do petróleo das décadas de 70 e 80 associadas à crescente preocupação com questões ambientais, conduziram o planejamento do setor energético mundial para uma estratégia de procura por fontes alternativas aos combustíveis fósseis (MOREIRA et al., 1998).

O Brasil sempre privilegiou o seu modelo de planejamento energético na geração a partir do aproveitamento hídrico, através dos inúmeros rios existentes em todas as regiões do país. A matriz energética brasileira é composta, aproximadamente, por 82% de geração hídrica ficando a restante distribuída entre a geração térmica, eólica e nuclear. O parque hidrelétrico de pequeno porte brasileiro é concentrado nas regiões de Sul e Sudeste. Atualmente os estudos de viabilidade de novos projetos ainda concentram-se, principalmente em São Paulo e Minas Gerais.

As centrais hidrelétricas incluem uma categoria denominada Pequena Central Hidrelétrica (PCH) que não corresponde a uma central em tamanho reduzido, mas sim a uma concepção diferente e mais simples de central hidrelétrica. Para julgamento no Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica - DNAEE, está em vigor a Portaria nº 136 limitando a PCH somente pela potência em 30 MW (FILHO et al., 1998).

Estima-se que existam mais de mil pequenas usinas desativadas e em condições de serem reformadas e modernizadas. Até os anos 70, quando foram inviabilizadas pelos megaprojetos hidrelétricos, Itaipu, por exemplo, existiam PCH's em quase todos os municípios médios brasileiros, segundo a Associação Brasileira dos Pequenos e Médios Produtores de Energia (APMPE, 2001).

Naquele momento, o Regime Militar implantado no País privilegiava os grandes empreendimentos, através de recursos estrangeiros. Este fato fez aumentar a dívida externa e contribuir para a dependência financeira e tecnológica das grandes potências econômicas mundiais patrocinadoras daquele Regime. Atualmente os órgãos ditos financiadores

internacionais, tais como FMI⁴ e Banco Mundial, não permitem o investimento na produção e tecnologia dos países subdesenvolvidos ou, como preferem dizer alguns, países em desenvolvimento ou emergentes. Este esquema levou ao colapso energético um país cujos recursos naturais são incomensuráveis. Fato que se pode comprovar pela crise energética do final dos anos 90 e início do ano 2000 vivida pelos brasileiros e setores da indústria.

Como forma de remediar os prejuízos causados por esta política governamental, as PCH's têm muito a contribuir, pois as quedas d'água de pequeno e médio porte representam uma importante opção de geração e são abundantes. Estas centrais surgem como uma alternativa viável devido ao custo médio acessível, que está em torno de R\$ 1,95 milhões por MW instalado (CARNEIRO, 1996). Outros fatores também estimulantes à implantação de PCH's são: o menor prazo de implementação, as facilidades oferecidas pela legislação e a disposição das concessionárias de energia elétrica em comprar o excedente gerado pelos autoprodutores e ainda disponibilizarem o acesso às suas linhas de transmissão a longa distância. Além disso, as PCH's têm outras vantagens intrínsecas, como: atenuação dos eventuais efeitos sócio-ambientais negativos que permitem, por exemplo, a não interferência no regime hidrológico do curso d'água (MOREIRA et al, 1998).

Este tipo de empreendimento possibilita um melhor atendimento às necessidades de carga de pequenos centros urbanos e regiões rurais. A partir de 1998 a construção destas unidades de geração foi incrementada por meio de uma série de mecanismos legais e regulatórios que serão vistos a seguir.

2.1 REGULAMENTAÇÃO DOS CRITÉRIOS QUE DEFINEM PCH

As PCH's representam um dos principais focos de prioridade da ANEEL⁵ no que tange ao aumento da oferta de energia elétrica no Brasil. A resolução da Agência nº. 394, de 4/12/98, pontua as seguintes questões:

- Potência instalada de até 30.000 kW (30 MW);
- Área inundada máxima de reservatório de 3 km²
- Outorga para o empreendimento, sem necessidade de licitação;
- Isenção de pagamento de taxa de compensação financeira;
- Isenção total de pagamento por uso das redes de transmissão e distribuição, para centrais que entrarem em operação até 2003 e redução de no mínimo 50% para as que entrarem após esta data;

⁴ FMI – Fundo Monetário Internacional

⁵ ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

- Dispensa em remunerar municípios e estados pelo uso dos recursos hídricos;
- Possibilidade de comercializar livremente a energia elétrica produzida com os consumidores cuja carga seja maior ou igual a 500 kW.

2.1.1 Panoramas Regionais

A seguir é mostrado o mapa da distribuição das PCH's atualmente no País. Como mencionado anteriormente, a maior densidade encontra-se nas regiões Sul e Sudeste, (ver Figura 2.1). A Tabela 2.1 apresenta a distribuição da potência instalada por regiões. Conforme mostra a Tabela 2.2, deverá haver um crescimento de PCH's em todo o país, com maior intensidade nas regiões Sul e Sudeste.

Existem investimentos para construção em muitos estados e em todas as regiões do Brasil. Particularmente, nos estados de Santa Catarina, Goiás e Paraná, um grupo paranaense investirá 200,6 milhões de reais em março deste ano na construção de 3, 1 e 3 PCH's, respectivamente (ADTP, 2001).



Figura 2.1 – Distribuição geográfica das PCH's no território brasileiro (ANEEL, 2001).

Tabela 2.1 – Distribuição da potência instalada no Brasil (ANEEL, 2001).

| REGIÃO | POTÊNCIA (MW) |
|------------------|----------------------|
| SUL | 287,5 |
| SUDESTE/C. OESTE | 498 |
| NORTE | 40,8 |
| NORDESTE | 75,8 |
| TOTAL | 902,1 |

O Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) recebeu em 2001 mais de 60 pedidos de financiamentos para projetos de instalação ou repotencialização de PCH's. Cerca de 30 projetos devem ser avaliados até o final do ano e outros 30 até o final de 2002. Existem também programas de incentivo institucional, como é caso do PCH-COM através de convênios com a ELETROBRÁS.

Se executados todos os projetos, o total de potência instalada de PCH's no Brasil saltará dos atuais 1.400 MW para 2.600 MW em 2003. Segundo dados da ANEEL, existem hoje 331 PCH's em funcionamento, responsáveis por cerca de 2,06% de toda a potência instalada no país.

Analistas avaliam que o mercado de PCH's sofrerá uma explosão de investimentos nos próximos três anos. Trata-se de um nicho de mercado aberto apenas em 1998, e que desperta agora o interesse crescente dos produtores independentes (APMPE, 2001).

Tabela 2.2 - Previsão, por região, da potência a ser instalada nas PCH's (ANEEL, 2001).

| ACRÉSCIMO DE POTÊNCIA (MW) – ANOS 2001 a 2003 PROJETOS CADASTRADOS NA ANEEL | | | | | | |
|--|---------|--------|-------|----------|--------|---------|
| ANO | REGIÕES | | | | Nº PCH | TOTAL |
| | SUL | SE/CO | NORTE | NORDESTE | | |
| 2001 | 37,76 | 9,1 | - | - | 7 | 46,86* |
| 2002 | 145,7 | 184,3 | - | - | 26 | 330,0** |
| 2003 | 240,25 | 769,68 | 12,7 | 16,15 | 84 | 1038,88 |

(*) Em construção: 46,86 MW

(**) Em construção durante o ano de 2001: 181,7 MW
TOTAL (117 PCH'S) 1.415,78 MW

Segundo o Sistema de Informação do Potencial Hidrelétrico (SIPOT) da Eletrobrás, existe no Brasil um potencial de 9.795,74 MW que podem ser obtidos com a construção de 924 PCH's (ADTP, 2001).

2.2 MOTIVAÇÃO PARA MODERNIZAÇÃO DE PCH

Na seção anterior foi demonstrada a importância das pequenas centrais no cenário energético do País, o que por si só justificaria a busca de eficiência no projeto de novas e modernização das PCH's existentes.

Devido à sua idade construtiva e ao aumento de consumo provocado pela urbanização e facilidade na aquisição de eletrodomésticos por uma maior parte da população, fica patente a necessidade em aumentar a oferta de energia. Uma das alternativas viáveis de melhoria de rendimento das PCH's e sua modernização. O termo modernizar, neste contexto, é quase sinônimo da palavra automatizar, pois implica na reforma de equipamentos e automação parcial ou total, conforme será detalhado a seguir. A decisão em modernizar recai primordialmente em questões econômicas, mas também da política interna da empresa, da qualidade da mão-de-obra, da necessidade de treinamento e da cultura administrativa dos proprietários.

Para automatizar uma PCH existem várias alternativas possíveis e viáveis que devem ser escolhidas de acordo com os objetivos a serem alcançados (ABRAHÃO, 1999). Deste modo, as seguintes funções podem ser incorporadas:

- ↳ Programação automática de geração (partida e parada das máquinas);
- ↳ Monitoramento automático do nível de água do reservatório;
- ↳ Supervisão e comando da proteção;
- ↳ Análise de dados;
- ↳ Supervisão e controle a distância.

2.2.1 Alternativas de Automação

O grupo-gerador é a parte principal da usina e o local onde as energias potencial e cinética da água são transformadas efetivamente em energia elétrica. Na Figura 2.2 é mostrado um diagrama de blocos simplificado de um grupo-gerador genérico. Esta figura é baseada no trabalho de ABRAHÃO (1999). Foi utilizado Rede C/A de DE NEGRI (1996) para representar os subsistemas. A intenção é fazer uma análise que seja compreendida para as diversas configurações de conjunto Turbina-Gerador existentes. As opções para a

modernização dos sistemas de controle e atuação dos grupos geradores podem ser resumidamente apresentadas como:

- 1 - Modernização e reforma dos equipamentos existentes;
- 2 - Automação Parcial (*Partial Retrofit*);
- 3 - Automação Completa (*Full Retrofit*).

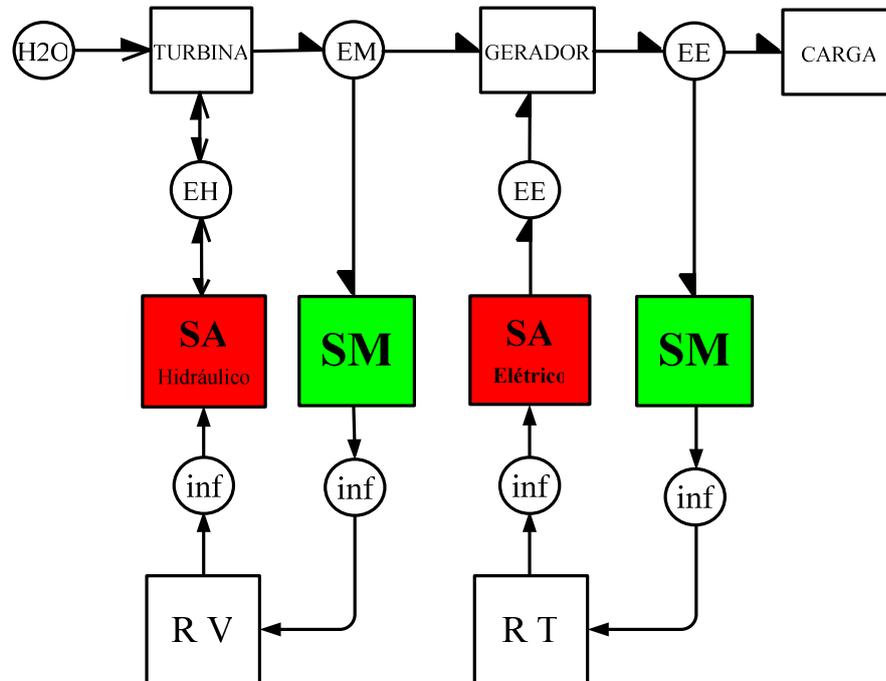


Figura 2.2 - Diagrama de blocos do grupo Turbina-Gerador genérico.

Onde,

E.E – Energia Elétrica;

E.H – Energia Hidráulica;

E.M – Energia Mecânica;

S.A – Sistema de Atuação: Atuador Hidráulico (Cilindros e válvulas) e Atuador Elétrico (Excitatriz rotativa ou estática);

SM – Sistema de Medição: sensores de posição e velocidade. Medidores: potência, tensão e corrente;

RV – Regulador de Velocidade: Mecanismo capaz de movimentar o anel distribuidor;

RT – Regulador de Tensão: circuitos elétricos ligados à excitatriz rotativa ou estática.

A modernização e reforma dos equipamentos existentes na usina pode ser completa, podendo demandar tempo e custos elevados. Considerando que os equipamentos sejam

antigos, as peças de reposição serão fabricadas por encomenda ((STACH, 1991), (GARCIA, 1995) e (SAAD, 1996), citadas por ABRAHÃO, 1999)). Mesmo com a substituição, há que avaliar a vida útil das peças substituídas e partes não reformada. Para a manutenção e operação da unidade reformada, a equipe precisa ter conhecimento e experiência suficientes.

Na modernização ou *retrofit* parcial, são substituídas somente as partes destacadas no diagrama da Figura 2.3.

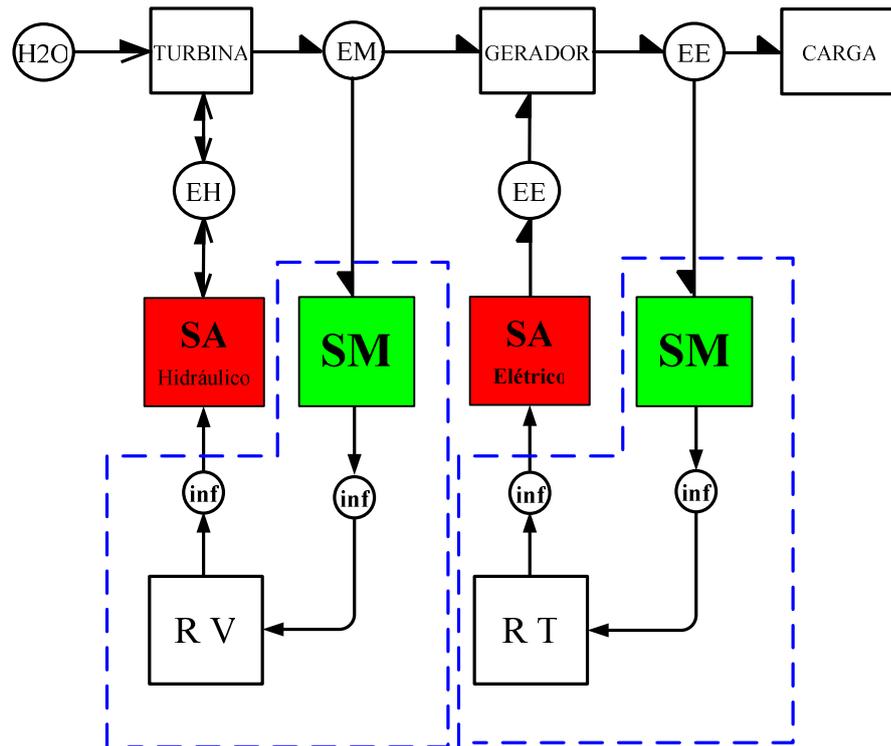


Figura 2.3 - Automação parcial

Onde,

SM – Sistema de Medição: sensores de posição e velocidade. Medidores: potência, tensão e corrente;

RV – Regulador de Velocidade: Sistema microprocessado capaz de controlar o anel distribuidor;

RT – Regulador de Tensão: Sistema microprocessado capaz de controlar a excitação dinâmica;

SA - Atuador Hidráulico (Cilindros e válvulas). Atuador Elétrico - Circuitos elétricos ligados à excitatriz rotativa. Permanecem os mesmos.

O regulador de velocidade mecânico de turbinas e seu sistema de realimentação são

substituídos por um regulador eletrônico, realimentado por sensor digital de velocidade informando a rotação da máquina; e sensor de posição com a informação da posição do dispositivo de atuação hidráulico (cilindro). O regulador de tensão de excitação deve ser substituído por um controlador eletrônico automático, mantendo-se o dispositivo de excitação rotativo convencional (CARNEIRO, 1996), (GARCIA, 1995) e (SAAD, 1996).

Na Automação Completa ou *full retrofit* são feitas as substituições dos reguladores e suas realimentações, obtendo-se todos os benefícios da modernização parcial, inclusive o controle digital (Figura 2.4).

Para o sistema de excitação do gerador, nesse nível de automação, propõe-se o uso de sistemas de excitação estática em substituição aos de excitação rotativa, que podem ser interligados ao sistema supervisor mais facilmente e diminuem as perdas de potência, entre outras vantagens (CARNEIRO, 1996) e (STACH, 1991).

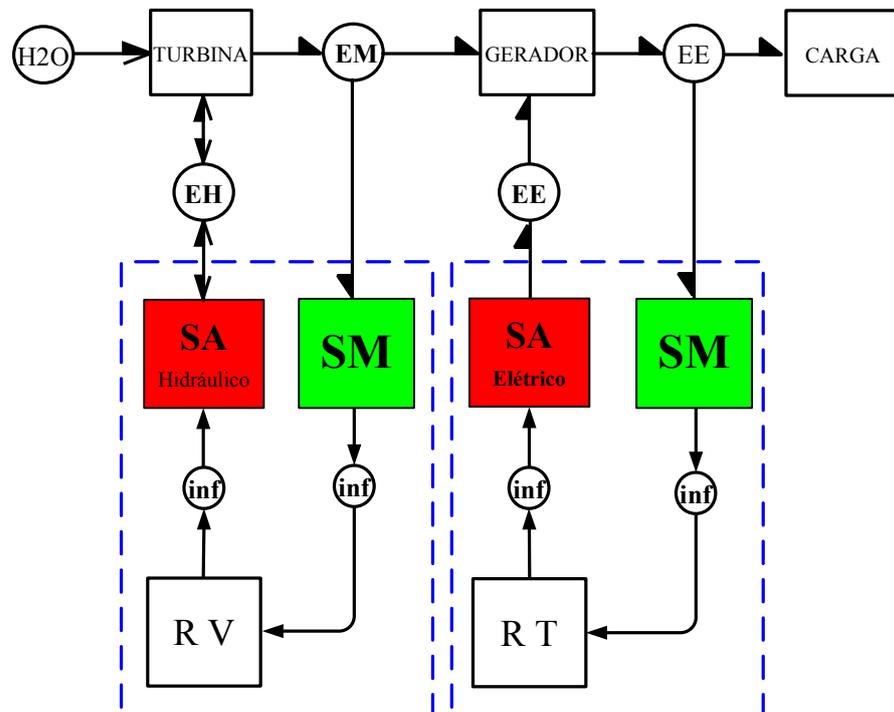


Figura 2.4 - Automação completa

SA - Sistema de Atuação Elétrico – Dispositivos que fazem parte do circuito eletrônico responsáveis por controlar a tensão de excitação no campo do gerador. Por exemplo, Ponte de Tiristores;

SA - Sistema de Atuador Hidráulico – Válvulas e servomotor, mais a eletrotécnica necessária ao funcionamento do conjunto.

A decisão quanto ao âmbito da modernização fica a cargo do proprietário da usina. Entretanto, independentemente da escolha, é importante que haja uma sistematização que facilite o processo de automatização por parte da empresa que executará o projeto. Se esta possui uma definição clara e bem documentada de todos os subsistemas que compõem a usina e suas interligações, poderá influenciar na decisão do cliente. Além disto, uma vez iniciado o projeto, tais documentos poderão diminuir o tempo de execução da obra, sem negligenciar a segurança. Este é mais um aspecto que poderá ser utilizado para persuadir o cliente.

Com este propósito, o presente trabalho constrói-se um modelo, que será chamado de Modelo de Referência, onde estarão contidos todos os subsistemas que fazem parte de uma PCH típica. Sendo assim, conforme a opção de modernização e os requisitos do projeto, a partir do modelo de referência o fornecedor poderá definir com maior clareza as atividades que terá de realizar.

Ao incluir ou retirar equipamentos e/ou dispositivos, é de fundamental importância para a evolução do projeto, que estas decisões sejam facilmente mapeadas ao longo do trabalho podendo-se, assim, vislumbrar clara e rapidamente suas influências e conseqüências no âmbito do projeto com um todo. Um exemplo típico da importância de uma boa documentação é saber em que parte do software que comanda a partida da turbina sofrerá a influência da retirada ou inclusão do sensor de nível de óleo do mancal de escora. A resposta para esta questão deve ser dada através de documentação compreensível pelos engenheiros mecânico e elétrico do fornecedor e do cliente, e pelo Programador que irá fazer ou modificar o software correspondente. Este processo deve ser mão-dupla: qualquer decisão tomada pelo Programador poderá ser mapeada nos dispositivos que compõem o sistema, evitando que sejam adotadas soluções em nível de software que comprometem ou inviabilizam o funcionamento dos componentes e dispositivos elétricos e mecânicos. Por exemplo, o tempo de processamento de uma parte do algoritmo poderia ser bem menor que o de leitura e atualização da saída daquele sensor.

CAPÍTULO III

MÉTODOS E FERRAMENTAS

Neste capítulo serão definidos e explicados os métodos para modelagem e as ferramentas de software utilizadas ao longo da sistematização para o projeto de sistemas de automação.

Quanto aos métodos, serão apresentados: Rede de Petri C/A, Grafcet, UML, que serão empregados através de ferramenta CASE⁶.

3.1 REDE DE PETRI CANAL/AGÊNCIA

As Redes de Petri normalmente são vistas como ferramentas gráficas para modelagem e análise de sistemas com alto índice de concorrência (paralelismo), - como os de automação e protocolos para comunicação de dados -, que possibilita descrever o comportamento do sistema em análise a eventos discretos. Esta abordagem é aplicada às Redes de Petri Marcadas e a sua variação as Redes de Petri Coloridas, que vieram à tona com Carl Adan Petri, formulador da base teórica do modelo matemático que leva seu nome. Apesar de serem estas as mais populares, em especial no âmbito acadêmico, não foi a abordagem dada aqui. No presente trabalho foram empregadas as Redes de Petri Canal/Agência, de agora em diante Redes C/A, que possibilitam a modelagem **Funcional** e **Estrutural** de sistemas. Esta opção foi feita porque os conceitos representados pelos elementos que compõem a rede: retângulos, círculos e setas, são de fácil e rápido entendimento e, sobretudo, representativos. Características importantes quando se pretende empregá-las em uma metodologia cujos usuários serão profissionais de diferentes perfis.

A notação em Redes C/A é uma representação diagramática que emprega dois elementos básicos: as *unidades funcionais ativas* (agências), representadas por retângulos, e as *unidades funcionais passivas* (canais), representadas por círculos, sendo estes dois elementos interligados através de arcos direcionados HEUSER (1990 citado por DE NEGRI, 1996). Sob a perspectiva funcional, as unidades passivas correspondem aos recursos que fluem através do sistema: energia, matéria e informação ou suas formas de manifestação, tais como: eletricidade, peças em uma linha de produção, ferramentas, sinais, dados etc. As unidades

⁶ CASE – *Computer Aided Software Engineering*

funcionais ativas são designadas atividades, correspondendo às operações aplicadas sobre os recursos, tais como: bombeamento, montagem, transporte, processamento etc.

Em uma perspectiva estrutural as unidades funcionais passivas são designadas canais, indicando aqueles componentes do sistema que dão suporte para que os recursos fluam sem causar modificação em seu estado. Por exemplo: tubulações, eixos, fios, correias transportadoras, depósitos, mensagens, memórias etc. Através dos retângulos representam-se as agências que correspondem ao local onde ocorrem as atividades, tais como: bombas, componentes de máquinas, estações de trabalho, reatores químicos, objetos em software, entre outros. Observe-se que o direcionamento indicado pelos arcos que acoplam estes elementos não tem significação sob o ponto de vista estrutural. A tabela 3.1 apresenta a simbologia usada para os elementos da notação Rede C/A.

Tabela 3.1 – Rede de Petri Canal/Agência – Elementos básicos (DE NEGRI, 1997).

| ELEMENTOS BÁSICOS | | | |
|---|------------------------------|-----------------------|----------------------------|
| Símbolo | Designação Genérica | Perspectiva Funcional | Perspectiva Comportamental |
|  | Unidades Funcionais Ativas | Atividades | Agências |
|  | Unidades Funcionais Passivas | Recursos | Canais |
| INTERLIGAÇÃO DOS ELEMENTOS | | | |
| Símbolo | Arcos Direcionados | | |
|  | Fluxo de Informação | | |
|  | Fluxo de energia | | |
|  | Fluxo de Matéria | | |

3.1.1 Regras de Refinamento e Condensação

O refinamento de um canal ou de uma agência consiste em seu detalhamento, identificando-se novos canais e agências internas, conforme ilustrado na Figura 3.1. Do mesmo modo, canais e agências podem ser agrupados formando elementos condensados.

Tanto a rede refinada como a condensada continuam sendo Redes C/A, logo, a regra básica de só haver interligação entre canais e agências deve ser sempre obedecida.

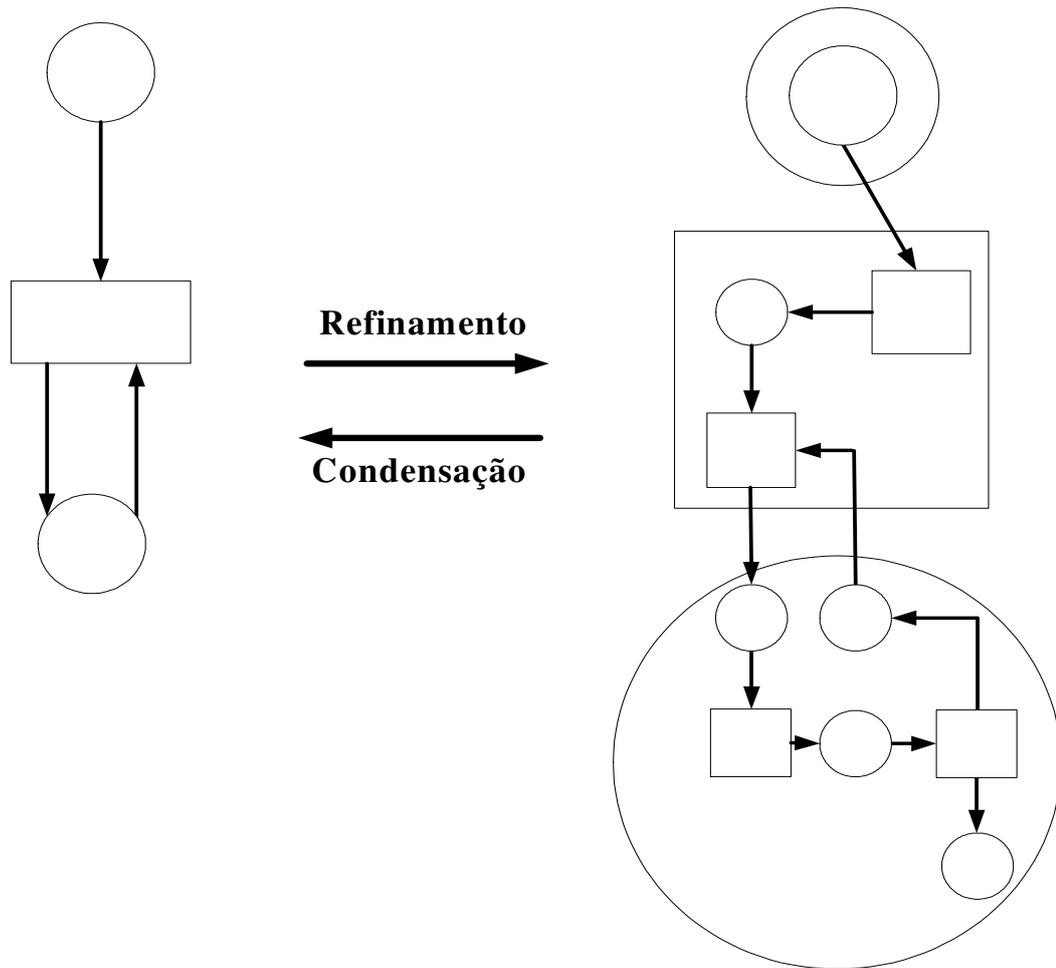


Figura 3.1 – Mecanismo de refinamento e condensação de redes C/A (DE NEGRI, 1997).

3.2 GRAFCET

Grafcet é o acrônimo de GRAPhe Fonctionnel de Commande Etape/Transition, do francês. Para o português, GRÁfico Funcional de Controle de Etapas e Transições.

O Grafcet é um diagrama derivado da Rede de Petri e tornou-se base para norma IEC-848 (IEC, 1988) sob a denominação de diagrama funcional ou SFC (*Sequential Function Chart*). O Grafcet foi definido originalmente como um formalismo gráfico para descrição do comportamento de sistemas de automação seqüencial a eventos discretos. Sua inclusão no padrão IEC 1131-3 (IEC, 1993) para programação de CLP fez aumentar a abrangência de suas aplicações.

Como mencionado, Redes de Petri Marcadas poderiam ser usadas para descrição comportamental. Entretanto, o Grafcet teve melhor receptividade por parte das pessoas que

trabalham na indústria; este foi um dos propósitos na sua concepção. Com a padronização, a ferramenta ganhou credibilidade mundial no âmbito da indústria.

No campo acadêmico, muitos trabalhos foram e estão sendo realizados nesta área, com enfoques diversos: seja na concepção de editores e ferramentas para simulação a softwares de controle em tempo real. Como pode ser visto no trabalho de PARDO et al. (1998).

Outra linha de pesquisa importante é a que busca reunir a teoria de Grafcet ao desenvolvimento de software baseados na metodologia de programação Orientada a Objeto (OO) e, especialmente, empregando a abordagem UML. Unindo o formalismo e praticidade do Grafcet com as facilidades e o potencial de uso das ferramentas CASE para modelagem de software OO. Isto pode ser comprovado através dos trabalhos de GAERTNER e THIRION (1999). Com relação à padronização IEC há um especial destaque ao trabalho de BONFÈ e FANTUZZI (2000).

3.2.1 Elementos do Grafcet

O Grafcet contém dois tipos básicos de elementos: passos e transições, ligados por arcos orientados. Cada passo é representado por um quadrado e pode estar nas situações ativado e desativado. O passo inicial - que está ativado na situação inicial- é representado por um quadrado duplo. No diagrama da Figura 3.2, o quadrado marcado com o número 0. A cada passo pode ser associada uma ação ou comando representado por um retângulo anexo ao passo. A Figura 3.2 exemplifica os elementos do Grafcet para o sistema de acionamento de cilindros. Existem outros mecanismos que podem ser utilizados no Grafcet quando se tornarem maiores e mais complexos. Um deles é acionar outro Grafcet através da ação associada a um passo. Este segundo Grafcet evolui e retorna para aquele que o acionou. Aplicações deste tipo podem ser visto em BARACOS (1992). O livro de BOLLMANN (1996) traz os conceitos básicos e avançados da teoria de Grafcet, tais como: programas paralelos, saltos, repetições e inúmeros exemplos práticos. Aspectos formais de Grafcet podem ser encontrados nos trabalhos de XOÁN e RAMÓN (1998).

Sistema de Acionamento de Cilindros ← Título do Grafcet

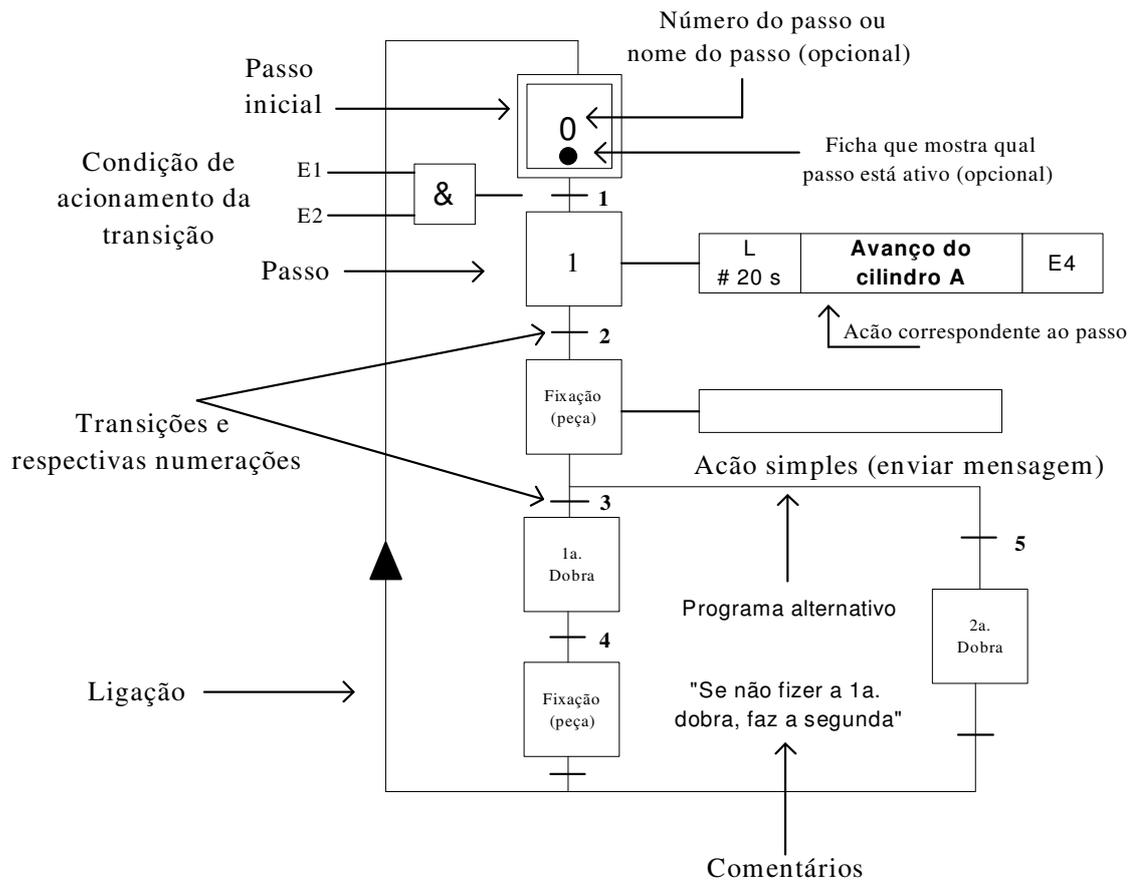


Figura 3.2 - Elementos básicos do Grafcet

Estes recursos foram explorados neste trabalho, com o propósito de modularizar e hierarquizar o desenvolvimento do sistema. Como se pode ver na Figura 3.3, a primeira ação do Grafcet 'programa Principal' é a transição de disparo para a primeira ação do Grafcet 'tarefa 1', fazendo-o evoluir; quando este termina, sua ação "concluído" será a transição que dispara o próximo passo no Grafcet 'programa principal'.

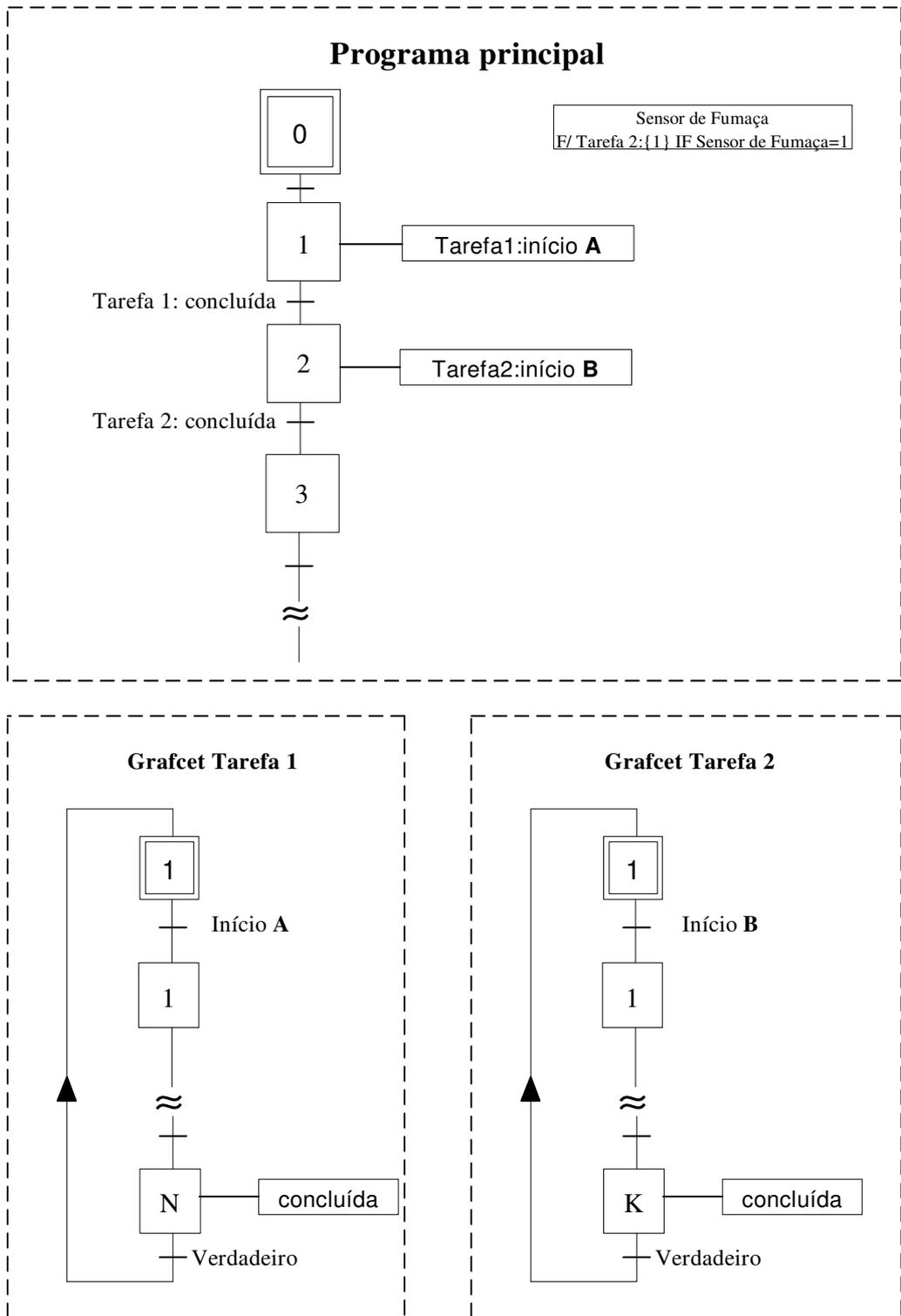


Figura 3.3 - Modo procedural para Grafcet e ação *stand alone*.

3.3 UML

Tendo iniciada no final dos anos 80 e consolidando-se nos anos 90, a programação Orientada a Objetos (OO) ainda é hoje, e continuará sendo por mais alguns anos, uma importante ferramenta para o desenvolvimento de software, principalmente porque a cada dia os programas tornam-se maiores e mais complexos.

A OO é uma filosofia de programação e uma mudança de paradigma da programação estruturada, cuja transição para OO nem sempre é fácil. Por esta razão alguns estudiosos defendem que esta filosofia seja ensinada no início da vida do programador para livrá-lo dos vícios da programação estruturada.

RUMBAUGH et al. (1996) define OO como “uma nova maneira de pensar problemas utilizando modelos organizados a partir de conceitos de mundo real. O componente fundamental é o **Objeto** que combina estrutura e comportamento em uma única entidade.”

A tecnologia de Objetos oferece modularidade de seus elementos podendo-se tomar um subconjunto existente e integrá-lo de maneira diferente em outra parte do sistema.

3.3.1 Conceitos Básicos de OO

A seguir serão apresentados, resumidamente, alguns conceitos básicos de OO extraído de FURLAN (1998), necessários para o entendimento do que foi modelado nesta dissertação. Existe uma vasta literatura disponível onde os conceitos podem ser aprofundados, podendo-se citar: SCHILDT (1996), SCHILDT (1998), BARRY (1988), FURLAN (1998), TEPFENHART e WILLIAM (1997) e MADEIRA (1995).

Objeto – É um elemento que representa o mundo real. Uma variável de um tipo definido pelo usuário. Pode parecer estranho no início pensar em um objeto, que liga código e dados, como uma variável. No entanto, na programação OO, é exatamente isto que ocorre. Quando se define um objeto, está implicitamente criando um novo tipo de dados.

Classe – Agrupamento de objetos similares que apresentam os mesmos atributos e operações;

Atributos – Característica particular de ocorrência da Classe;

Operações – Lógica contida em uma classe para designar-lhe um comportamento;

Mensagem – Uma solicitação entre objetos para invocar certa operação;

Herança – Compartilhamento pela subclasse dos atributos e operações da classe pai;

Instância de classe – Uma ocorrência específica de uma classe. É o mesmo que objeto;

Generalização – Atributos e operações comuns compartilhados por classes.

Quando os programas começaram a crescer em tamanho e complexidade, tornou-se quase que obrigatório utilizar mecanismos para administrar e organizar todas as informações. Por isto, em meados dos anos 70 e início dos 80, surgiram os métodos de modelagem de software. No período de 1989-1994 o número de métodos relatados saltou de menos de 10 para mais de 50. Os que se tornaram mais famosos foram: BOOCH, OMT, OOSE/OBJECTORY, SHLAER/MELLOR, COAD/YOUDON, FUSION etc. (FURLAN, 1998).

3.3.2 Definições da UML

UML são as iniciais de *Unified Modeling Language*, que em português é traduzida como Linguagem de Modelagem Unificada. É um mecanismo utilizado para administrar e organizar o desenvolvimento de software complexo.

A UML é a padronização da linguagem de desenvolvimento OO para visualização, especificação, construção e documentação de sistemas. A UML é proposta como a linguagem definitiva para modelagem de sistemas OO que, por ser unificada, facilita que grupos de desenvolvimentos de software interpretem de uma maneira correta e sem ambigüidades modelos gerados por outros analistas ou grupos de desenvolvedores.

Um dos objetivos iniciais por trás da UML é acabar com a chamada “guerra de métodos” dentro da comunidade da OO. Os principais criadores de métodos Grady Booch (BOOCH), James Rumbaugh (OMT) e Ivar Jacobson (OOSE) retiraram o que havia de melhor em suas metodologias, juntaram-nas e criaram a UML.

A meta da UML é descrever/modelar qualquer tipo de sistema, em termos de diagramas de OO. Naturalmente, o uso mais comum é a criação de modelos de sistemas de software, mas a UML pode também ser utilizada para descrever sistemas mecânicos sem qualquer software ou a mesmo a organização de um negócio.

No âmbito deste trabalho são explorados os Sistemas Técnicos, pois trabalham e controlam equipamentos técnicos, como telecomunicações, sistemas militares, ou processos industriais. Precisam manipular interfaces específicas dos equipamentos e possuem menos softwares padronizados do que os sistemas de informação.

Os diagramas na UML são a representação gráfica de um conjunto de elementos, geralmente representados como símbolos e arcos relacionamentos. São desenhados para permitir a visualização de um sistema sob diferentes perspectivas. Nesse sentido, um diagrama constitui uma projeção de determinado sistema. São os seguintes os que compõem a UML:

1. Diagrama Caso de Uso;

2. Diagramas Interação:
 - 2.1 - Seqüências;
 - 2.2 - Colaborações;
4. Diagrama de Classes;
5. Diagrama de Objetos;
6. Diagrama de Gráficos de Estados;
7. Diagrama de Atividades;
8. Diagrama de Componentes;
9. Diagrama de Implementação.

Apesar de a UML dispor destes 9 diagramas, não necessariamente, o projetista irá utilizar todos na modelagem do sistema. Para modelar um Sistema Técnico de tempo real, alguns autores como COLLE (1999) utilizam os diagramas de: Interação, Estados e de Implementação. Por outro lado, trabalhos como o de McLAUGHLIN e MOORE (1998) empregam: Caso de Uso, Colaboração (Seqüência e Colaborações), Classe, Atividades e Implementação. Já SELIC e RUMBAUGH (1998) usam: Classe, Colaboração e Estados. Em DOUGLASS (1999) vê-se: Caso de Uso, Estados e Seqüência. Diante destes exemplos observa-se que não existe uma forma única e rígida estabelecendo quantos e quais diagramas devem ser usados. A escolha dependerá do tipo de sistema a ser modelado, sua complexidade, tempo disponível, experiência do projetista etc. Por isto existe um campo de estudos na UML que trata exclusivamente da modelagem de sistemas técnicos. A literatura a este respeito é ampla.

No presente trabalho utilizam-se os diagramas de: Caso de Uso, Seqüências e Classes. Os diagramas de Estado e de Atividades poderiam substituir os Grafcet, se se desejasse apenas utilizar UML. Entretanto, perderia o apelo que tem o Grafcet na indústria.

A seguir serão definidos e exemplificados os diagramas e seu elementos utilizados no trabalho, extraídos de BOOCH et al.(2000), FURLAN (1998) e das Especificações 1.3 da UML (UML, 2000).

Caso de Uso – Tem o propósito de definir o comportamento de uma classe passiva sem revelar sua estrutura interna. São empregados para especificação de necessidades e funções oferecidas por uma classe. É, ainda, a linguagem de alto nível, compreensível para pessoas não familiarizadas com software, Figura 3.4.

Atores – O mundo externo é representado por atores que desempenham papéis. O ator é um agente que interage com o sistema, um tipo de usuário ou categoria com papel definido,

podendo incluir seres humanos, máquinas (computador, fresa etc), dispositivos (sensores, relés, disjuntores etc.).

Interação em Caso de Uso – O ator comunica-se com o sistema através do envio e recebimento de mensagens (estímulo).

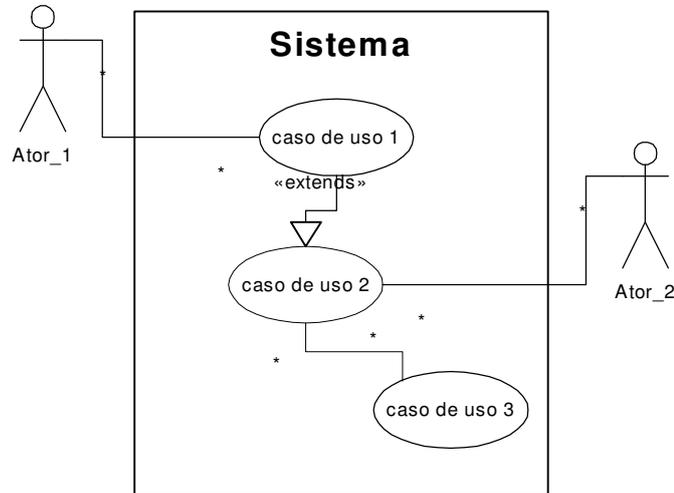


Figura 3.4 – Elementos do diagrama de Caso de Uso

Classe – Este diagrama é a essência da UML. Trata-se de uma estrutura lógica estática que mostra uma coleção de elementos declarativos: os atributos e as operações. Cada um dos atributos tem a sua visibilidade estabelecida - pública, privada e protegida - denotando como o elemento de modelo é visto fora de sua classe pelas outras classes. Existem quatro tipos de relacionamento entre as classes: Generalização (especificação), Agregação, Associação e Dependência. Figura 3.5.

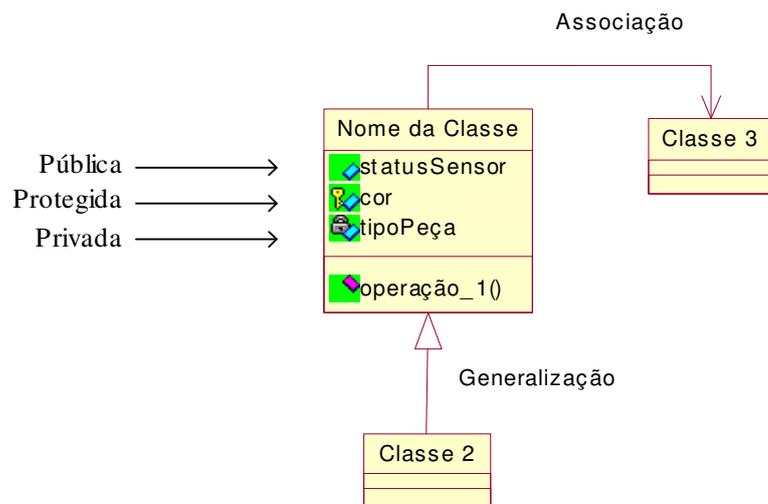


Figura 3.5 – Classe e seus elementos.

Os diagramas de Caso de Uso e de Classe representam a parte estática do sistema. Para modelar a parte dinâmica são empregados os Diagramas de Interação (Seqüência e Colaboração). Como suas funções são similares, a opção fica ao critério do projetista. O de Seqüência propicia uma idéia temporal e a ordem em que as interações acontecem, enquanto o de Colaboração representam melhor como os objetos são conectados estaticamente. Neste trabalho foi empregado o de Seqüência. As interações consistem em um conjunto de Objetos e seus relacionamentos, incluindo as mensagens trocadas entre estes. Na Figura 3.6 é mostrado um exemplo do diagrama e seus elementos. A leitura deve ser de cima para baixo e da esquerda para direita.

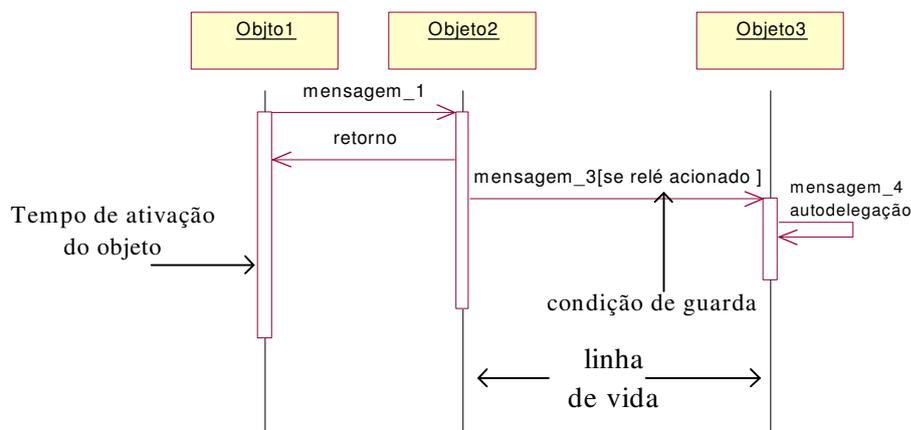


Figura 3.6 – Diagrama de Seqüência.

Existem diversos métodos para o desenvolvimento de softwares com características particulares específicas para tipos específicos de sistemas:

Métodos de desenvolvimento de software em larga escala: Rational Unified Process (RUP) e Catalysis.

- Métodos de desenvolvimento de software em pequena escala: eXtreme Programming, Wisdom, FURLAN, etc.

O trabalho de dissertação utilizou o método FURLAN (1998). Trata-se de uma abordagem simplificada, didática e concisa que é empregada para sistemas de baixa complexidade. Não é escopo deste trabalho o desenvolvimento de um software para o funcionamento completo de usinas hidrelétricas e sim o projeto da automatização da usina como um todo, que envolve outras tecnologias além da de software, a abordagem do autor mostrou-se adequada.

Todas as metodologias de projeto de software podem se beneficiar do uso de ferramentas CASE (*Computer Aided Software Engineering*). Sem este suporte a metodologia pode se

tornar muito trabalhosa quando empregada em sistemas grandes e muitos dos seus benefícios poderiam se tornar irrelevantes diante do esforço despendido para empregá-la.

Neste trabalho são utilizadas as ferramentas CASE: VISIO® e Rational ROSE®. Além do ambiente de programação Visual C++®.

CAPÍTULO IV

SISTEMATIZAÇÃO DA MODELAGEM DO PROJETO DE SISTEMAS MECATRÔNICOS.

4.1 - INTRODUÇÃO

Os termos metodologia e sistematização de projeto muitas vezes são empregados indistintamente. No contexto dos sistemas e produtos mecatrônicos, metodologia é definida diferentemente por vários autores (SHAKERI, 1998). Sistematização é um conjunto de métodos organizados e coordenados de forma coerente com linha específica de pensamento (SACCONI, 1998). Sistematizações e Metodologias de projeto são seqüências de passos que organizam o processo criativo para resolver problemas, sejam eles individuais ou de grandes grupos de profissionais.

A Figura 4.1 apresenta a estrutura de uma metodologia geral, proposta por SHAKERI (1998), que foi importante para as definições ao estabelece o processo de Sistematização no presente trabalho.

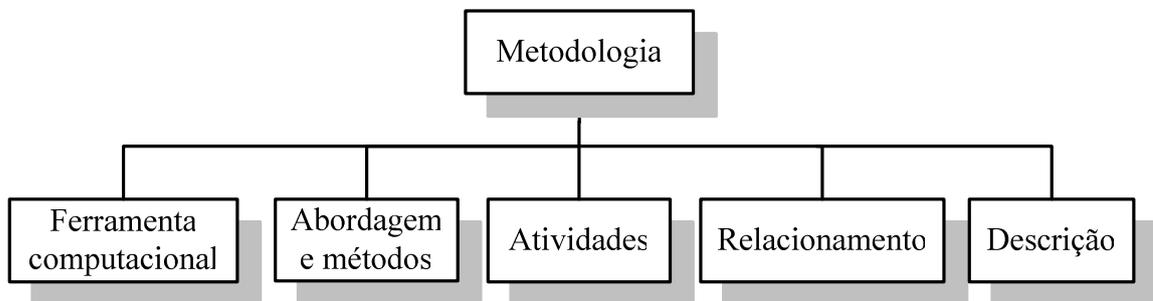


Figura 4.1 - Estrutura de metodologia (SHAKERI, 1998).

4.2 – SISTEMATIZAÇÃO DE MODELAGEM EXISTENTE NA LITERATURA

O trabalho de WHITTAKER et al. (1995) apresenta uma metodologia de projeto para Sistemas Mecatrônicos – SMec. A metodologia proposta é aplicada a um sistema de geração de energia elétrica a partir do movimento e ondas, conforme Figura 4.2.

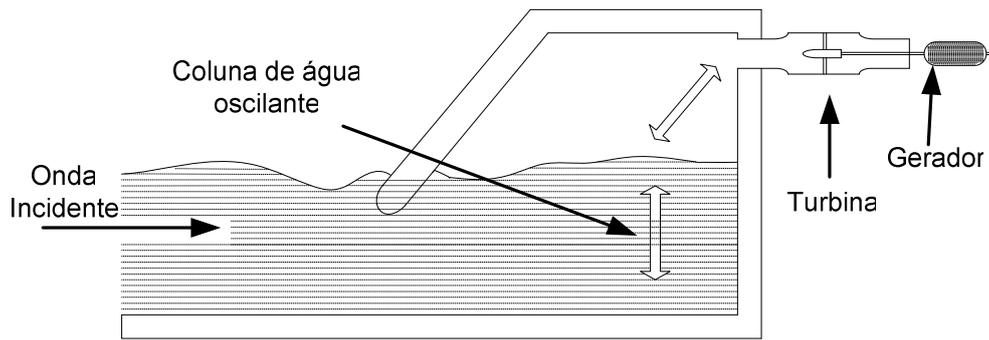


Figura 4.2 – Esquema de um dispositivo de geração (WHITTAKER et al., 1995).

O autor propõe o encaminhamento do projeto de acordo com a Figura 4.3, na qual são definidos os elementos de entrada em cada parte do projeto, sem, no entanto mostrar claramente como ocorrerá o desenvolvimento dentro de cada uma delas. A figura mostra um diagrama de fluxo muito simplificado da entrada de informação e as interações que ocorrem no projeto de uma estação de geração da onda. Cada bloco contém um processo complexo do projeto e por sua vez cada um dos blocos são interativos com seus vizinhos.

Portanto, são apenas linhas gerais para o direcionamento do projeto. A ênfase maior no trabalho é dada à parte de controle do sistema, onde: válvulas, sensores, bombas etc. são considerados Objetos. Também faz parte do trabalho o desenvolvimento de uma ferramenta que permitirá alta modularidade das partes que compõem o sistema de controle, a qual em sua concepção final propiciará a realização de simulações. Para o desenvolvimento deste software foi empregada Metodologia de Projeto Orientada a Objetos (OO) onde cada componente da planta, mecânico ou elétrico, foi descrito como Objeto.

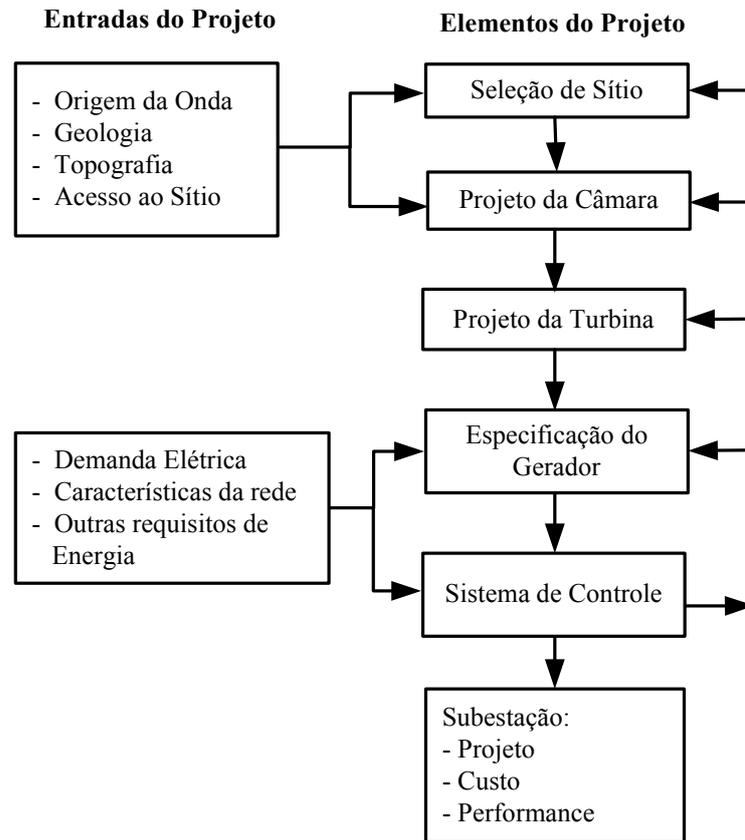


Figura 4.3 - Procedimento para o projeto (WHITTAKER et al., 1995).

LIPPOLD e WELP (1999) abordam o Projeto Conceitual de Sistemas Mecatrônicos tendo como preocupação especial o projeto de sistemas cuja configuração seja independente do domínio de aplicação, seja uniforme e possibilite bases para haver simulações já durante esta fase do projeto. Para tal, é empregada a teoria de Bond Graph (RAULT, 1992) que descreve o fluxo de energia entre as partes constituintes. Segundo o autor, atualmente este tipo de análise costuma ser feita na fase final do projeto, sendo esta uma das contribuições do trabalho. Foi utilizada a metodologia OO e seus conceitos de hierarquia e polimorfismo. Entretanto, ao invés de usar Objetos que são abstrações da TI (Tecnologia da Informação), utiliza abstrações de elementos de função (*F- elements*) e de elementos de trabalho (*W- elements*) e, desta forma, transfere características (atributos) e métodos (operações) para a respectiva Classe.

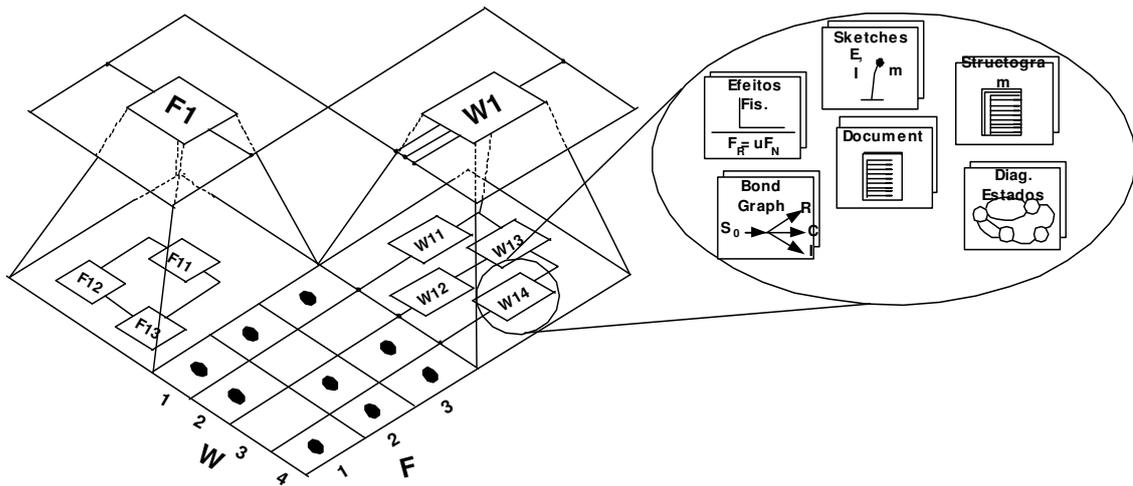


Figura 4.4 - Inter-relacionamento e hierarquia dos F-elements e os W-elements (LIPPOLD, 1999).

HUSSEIN (1999) propõe um procedimento para aplicar uma abordagem geométrica para modelar Sistemas Mecatrônicos. Inicialmente, são criados dois modelos geométricos: físico e lógico, estabelecendo as propriedades que constituem o sistema. Em seguida é determinada a interconexão entre ambos e construído um terceiro modelo. A modelagem do comportamento do SMec é determinada pela interação dos dois subsistemas, os quais capturam todas as suas diferentes propriedades. O subsistema físico cria efeitos desejados no processo, que são sentidos e espelhados no subsistema lógico. Como resultado, algumas variáveis serão afetadas, mudando de estado. Desta forma atribuirá um conjunto de sinais de controle que serão aplicados no subsistema físico com a finalidade de modificar seus recursos. O trabalho propõe uma metodologia geométrica para mapear e conectar os subsistemas usando uma linguagem uniforme.

Em sua Tese SHAKERI (1998) apresenta uma importante contribuição ao campo da metodologia de projeto de SMec, pois analisa profundamente trabalhos clássicos da área como os de BUUR (1990) e HILDRE (1996) buscando preencher lacunas que não teriam sido contempladas. O autor propõe a TMM (*The Mechatronic Methodology*). O diagrama da Figura 4.5 mostra as atividades em cada uma das fases desta metodologia.

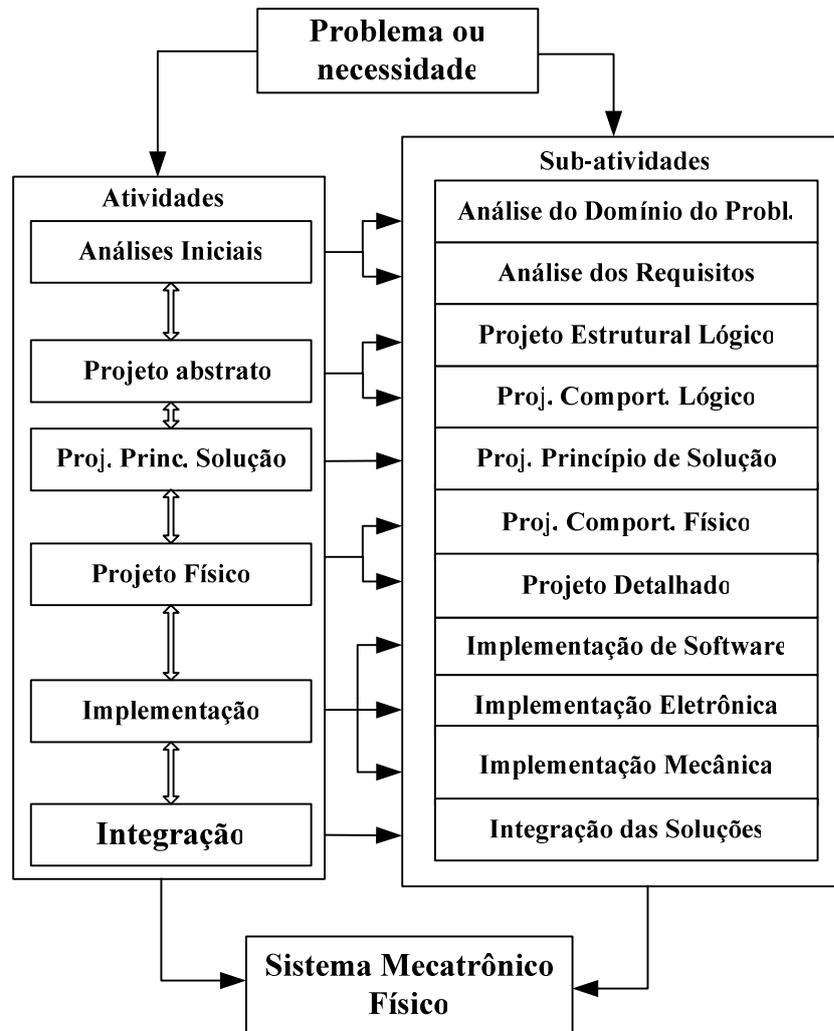


Figura 4.5 - Atividades e sub-atividades no TMM (SHAKERI, 1998).

Na Figura 4.6 é apresentado um detalhamento da Figura 4.5, destacando os resultados de cada uma das atividades e evidenciando que estes servirão como entradas para as atividades posteriores. A principal característica deste trabalho e que o diferencia dos anteriores está na utilização da abordagem OO, ao invés de Orientada a Ação, como foi o caso de BUUR (1990). Apresentando, ainda, uma descrição precisa do comportamento físico do sistema, que não foi contemplado em HILDRE (1996). Para tal, o autor valeu-se dos diagramas da UML que suportam toda a metodologia proposta.

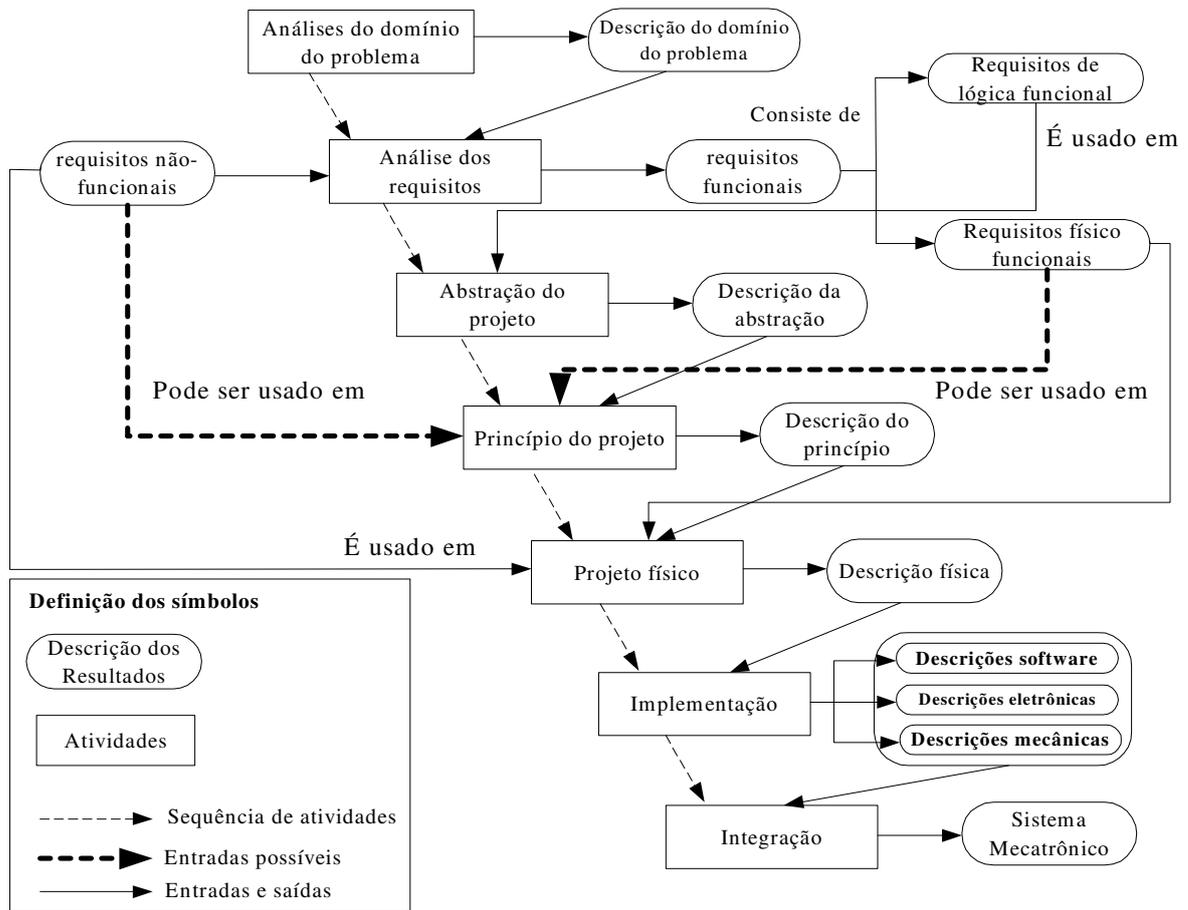


Figura 4.6 - As atividades e seus resultados (SHAKERI, 1998).

Analisando-se as Figuras 4.6, 4.7 e 4.8, complementando com a Tabela 4.1, é possível perceber algumas correspondências entre os trabalhos de SHAKERI (1998) e DE NEGRI (1996) quanto às subdivisões das fases de projeto. Há diferenças de nomenclaturas, porém a semântica é a mesma. A não correspondência substancial consiste em que o primeiro utiliza em todas as fases a abordagem a OO sob o suporte dos diagramas da UML, enquanto o segundo emprega no Projeto Conceitual outra ferramenta (Rede C/A) na descrição funcional e estrutural, e Grafcet na comportamental.

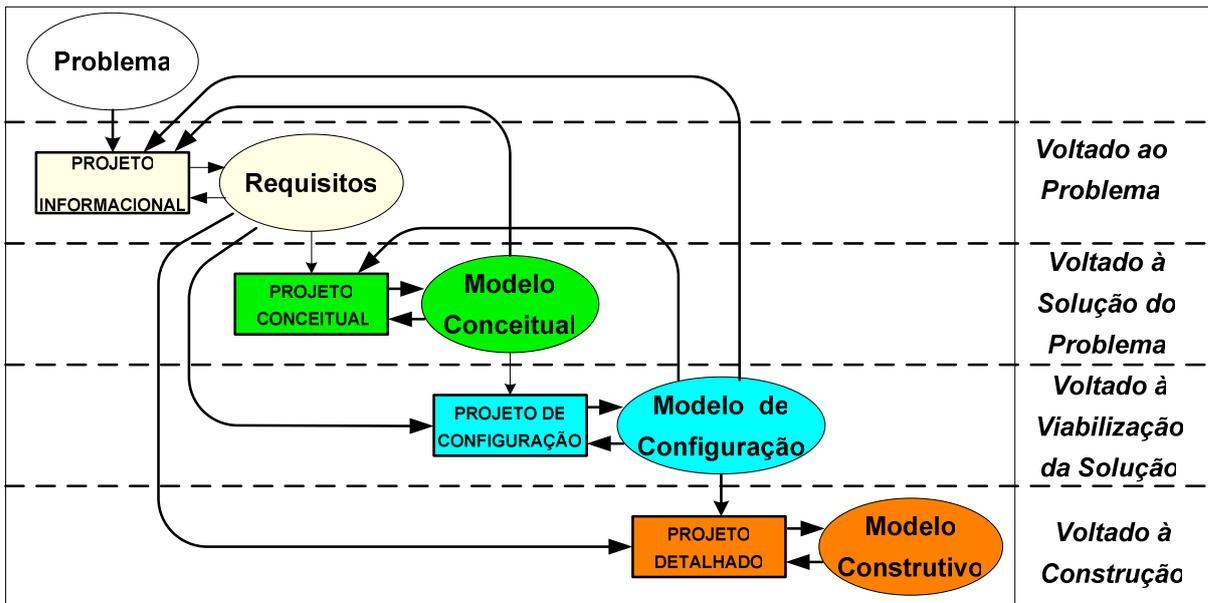


Figura 4.7 – Modelo funcional do processo de projeto para Sist. Automáticos (FURST, 2001).

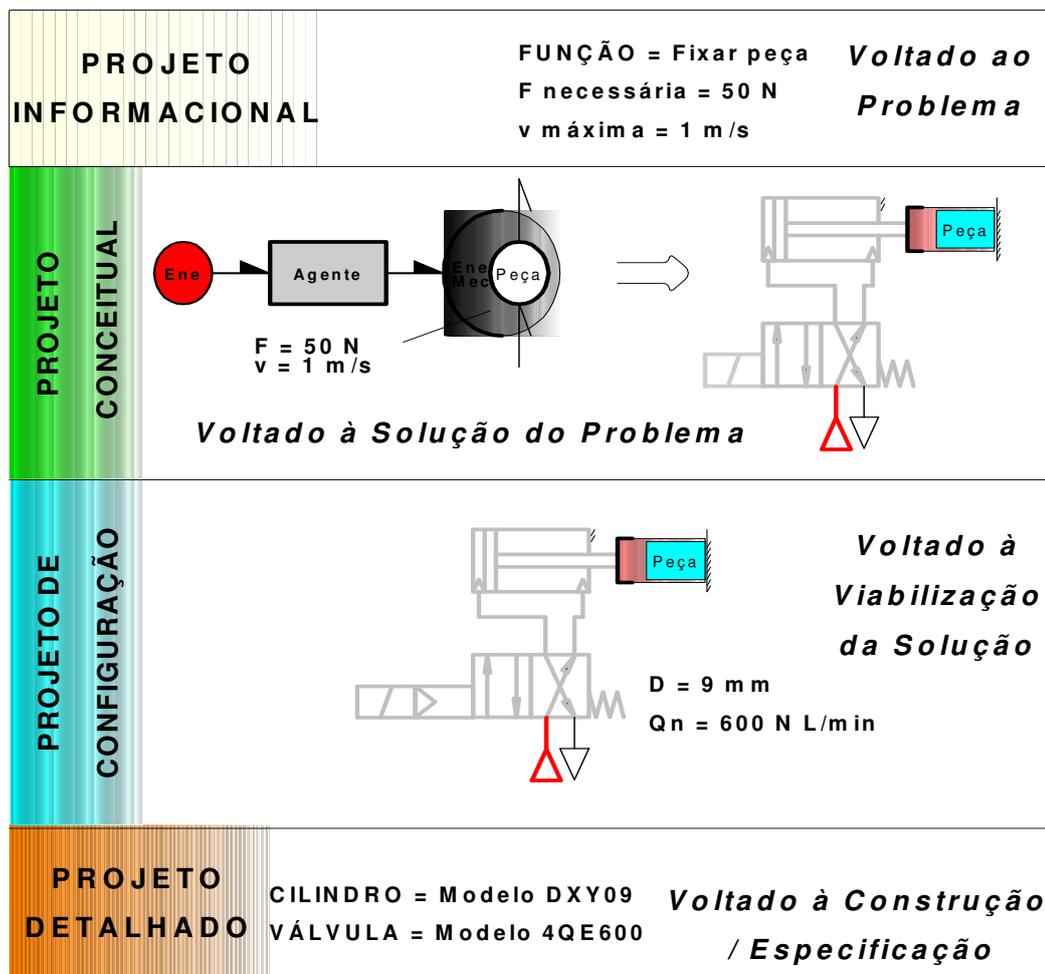


Figura 4.8 - Processo de projeto, detalhes de implementação (DE NEGRI, 2001).

Tabela 4.1 – Subdivisão do projeto de sistemas automáticos (DE NEGRI, 1996).

| Sistemas Automáticos | Sistemas Técnicos | | Software | |
|--------------------------------|-------------------------|--|----------|--|
| Fases | Fases | Passos | Fases | Passos |
| Análise do Problema | Estudo do Problema | + Estudo da Tarefa + Especificação de Requisitos de Projeto | Análise | + Análise de Requisitos do Usuário + Especificação de Requisitos do Usuário |
| Projeto Conceitual (Concepção) | Concepção | + Estudo da Função + Pesquisa de Princípios de Solução + Estruturação em Módulos Realizáveis | Análise | + Especificação de Requisitos do Software |
| Projeto de Configuração | Projeto de Configuração | + Configuração dos Módulos Principais + Configuração do Produto Total | Projeto | + Projeto do Sistema |
| Projeto Detalhado | Projeto Detalhado | + Fixar Instruções de Execução e Uso | Projeto | + Projeto Detalhado |

A seguir são mostradas as atividades das fases de projeto no contexto dos Sistemas Mecatrônico.

a) Projeto Informacional:

- Estudo da especificação técnica;
- Visita ao sítio e fazer registros técnicos: fotografias, croqui, relatos orais etc.
- Compreensão das funcionalidades;
- Entendimento inequívoco do desejo do cliente;

b) Projeto Conceitual ou Concepção

- Definição das técnicas de desenvolvimento, documentação para registros e comunicação, escolha das ferramentas de software: aplicativos, plataformas de trabalho, simulação etc. Por exemplo: Grafcet, OO, UML (definir quais os diagramas a serem utilizados), Windows ou Linux, plataforma de desenvolvimento do código (Visual C++, SQL etc.).
- Modelagem utilizando diagramas formais a registros técnicos empregando diagramas não específicos: Redes C/A e SA, SM e SAM;
- Mapeamento das Redes C/A em domínios específicos, através de desenhos esquemáticos (Software, Circuitos elétricos, hidráulicos etc.);

c) Projeto Físico ou Configuração ou Preliminar

- Projetos utilizando as técnicas e esquemáticos exclusivos dos domínios de conhecimentos específicos.

d) Projeto Detalhado

- Implementação: Descrição

- Software – Programação do código fonte do sistema;

- Mecânico – Escolha dos tipos e modelos dos acionamentos (válvulas, servomotores etc.);

- Elétrico – Escolha dos dispositivos de comunicação e processamento da informação, e dos dispositivos responsáveis pela alimentação dos circuitos etc.

Assim, a fim de sumarizar as abordagens de SHAKERI (1998) e DE NEGRI (1996), tem-se a Figura 4.9.

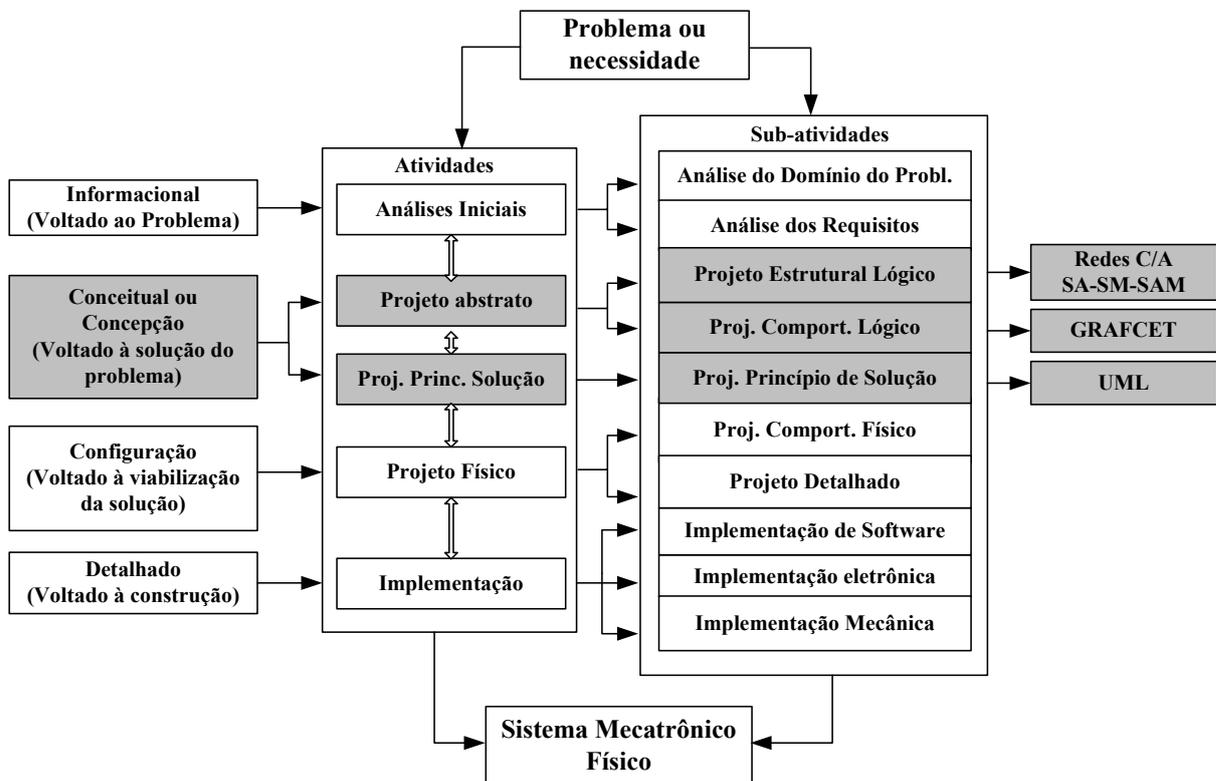


Figura 4.9 – Atividades do projeto Conceitual

4.3 SISTEMATIZAÇÃO PROPOSTA PARA SISTEMAS MECATRÔNICOS

Este trabalho de dissertação tem como objetivo apresentar uma Sistematização das atividades de projeto na fase Conceitual. Na área destacada da Figura 4.9, tem-se as atividades relacionadas aos diagramas responsáveis pela sistematização. Buscou-se uma sinergia entre as abordagens de DE NEGRI (1996) no Projeto Estrutural com as Redes C/A a de SHAKERI (1998) no Projeto de Princípio de Solução utilizando OO. Para o Projeto do comportamento lógico usou-se o GRAFCET. Uma das razões para esta escolha foi preservar e consolidar a nomenclatura proposta pelo NEDIP⁷ na área de sistemas técnicos e, utilizar ferramenta robusta, comercial e de aceitação no meio industrial.

Na Figura 4.10 tem-se o fluxograma que representa a sistematização das atividades do projeto.

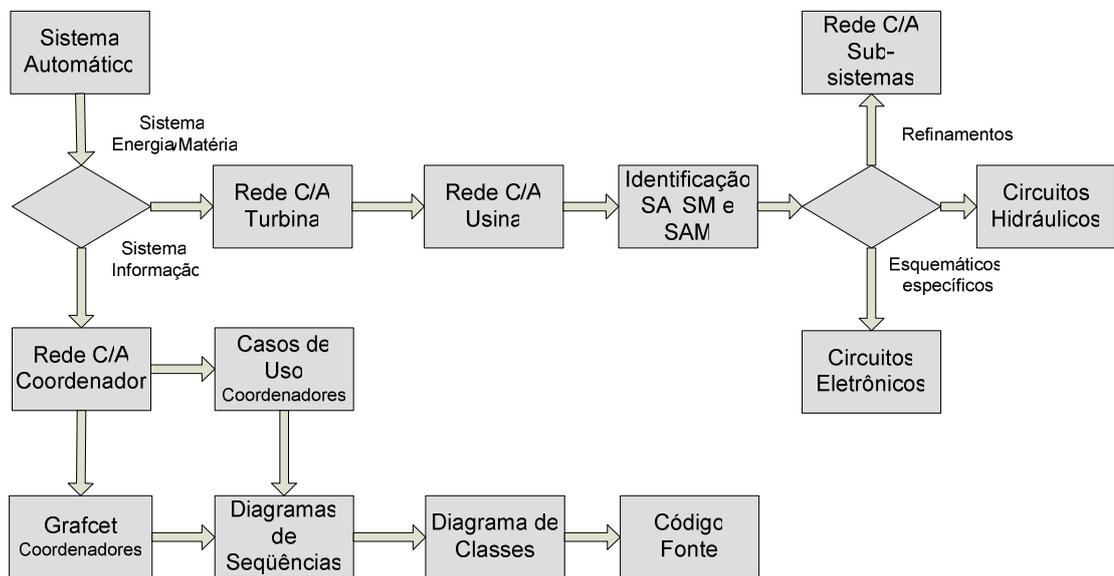


Figura 4.10 – Fluxograma das atividades do projeto Conceitual para Sistemas Mecatrônicos.

O Sistema Automático é uma atividade genérica - que neste caso corresponde a todas as ações relacionadas à automação de uma usina hidrelétrica -, é modelado dividi-se em duas partes: Fluxo de Energia/Matéria e Fluxo de Informação. Seguindo-se as setas têm-se todas as atividades necessárias ao modelamento. Na seção seguinte, explicitam-se estas etapas com os diagramas pertinentes.

Como mencionado, o foco do trabalho está no Projeto Conceitual. Com o intuito de demonstrar a viabilidade da sistematização proposta, foi modelada a modernização de uma

⁷ NEDIP – Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos do Dep. de Eng. Mecânica da UFSC

PCH, desde as atividades do Projeto Informacional até o Projeto Detalhado, onde foi implementado o código fonte de parte do funcionamento da usina. Este estudo de caso encontra-se no capítulo 6.

Antes de iniciar a apresentação dos diagramas faz-se necessário uma descrição Funcional/Estrutura e Comportamental dos Sistemas Automáticos.

Na Figura 4.11, é mostrado o modelo funcional de sistemas automáticos empregando a notação de Rede C/A. No lado esquerdo está a forma geral do sistema e à direita o seu refinamento. Tem-se o Ambiente Externo que se comunica com as Agências através dos Canais de informação e energético/material. O sistema automático é uma grande agência que se comunica com o Ambiente Externo. Dentro deste há outras agências, categorizadas como Sistemas de Informação e Energético/Material, que se comunicam entre si por meio de canais de informação.

Utilizando-se as regras de refinamento das Redes C/A, detalham-se as agências do sistema automático. Há recursos de informação e energéticos/materiais que são consumidos durante o Processamento de Informação e de Energia/Matéria. A comunicação entre Sistema de inf. e Sistema ene/mat é realizada por canais que, por sua vez, estão ligados a outras agências. Estas são as ligações ou as interfaces entre os subsistemas. Estas interfaces denominam-se: Sistemas de Medição (SM), Sistemas de Atuação (SA) e Sistemas de Atuação e Medição (SAM). Por exemplo

- Sistemas de Medição (SM): sensor, transdutores microprocessados ou não;
- Sistemas de Atuação (SA): cilindro, atuador hidráulico, servomotor, válvulas, bombas
- Sistemas de Atuação e Medição (SAM): são formados por SA's e SM's.

Estes conceitos são ilustrados através do seguinte exemplo. Considerar que por meio do canal (inf), alcança a agência Sistema de informação a ordem de acionar um cilindro. Este recurso (a informação) é consumido, processado e enviado, chegando à agência SA, que faz o cilindro avançar. A energia proveniente desta ação é consumida, processada e enviada para o SM, que poderia ser um sensor que verifica se o cilindro avançou efetivamente. Esta informação chega ao Sistema de informação, fechando o ciclo. Sabe-se que nos sistemas existem diversos componentes necessários ao acionamento de um cilindro, por exemplo, o solenóide da válvula que libera a passagem de óleo que enche camisa, fazendo-o avançar.

A descrição Comportamental de sistemas automáticos pode ser feita através de diversas maneiras, entre as quais: Redes de Petri Marcada, Autômatos, Máquina de Estado e, também, Grafcet, que foi a utilizada neste trabalho.

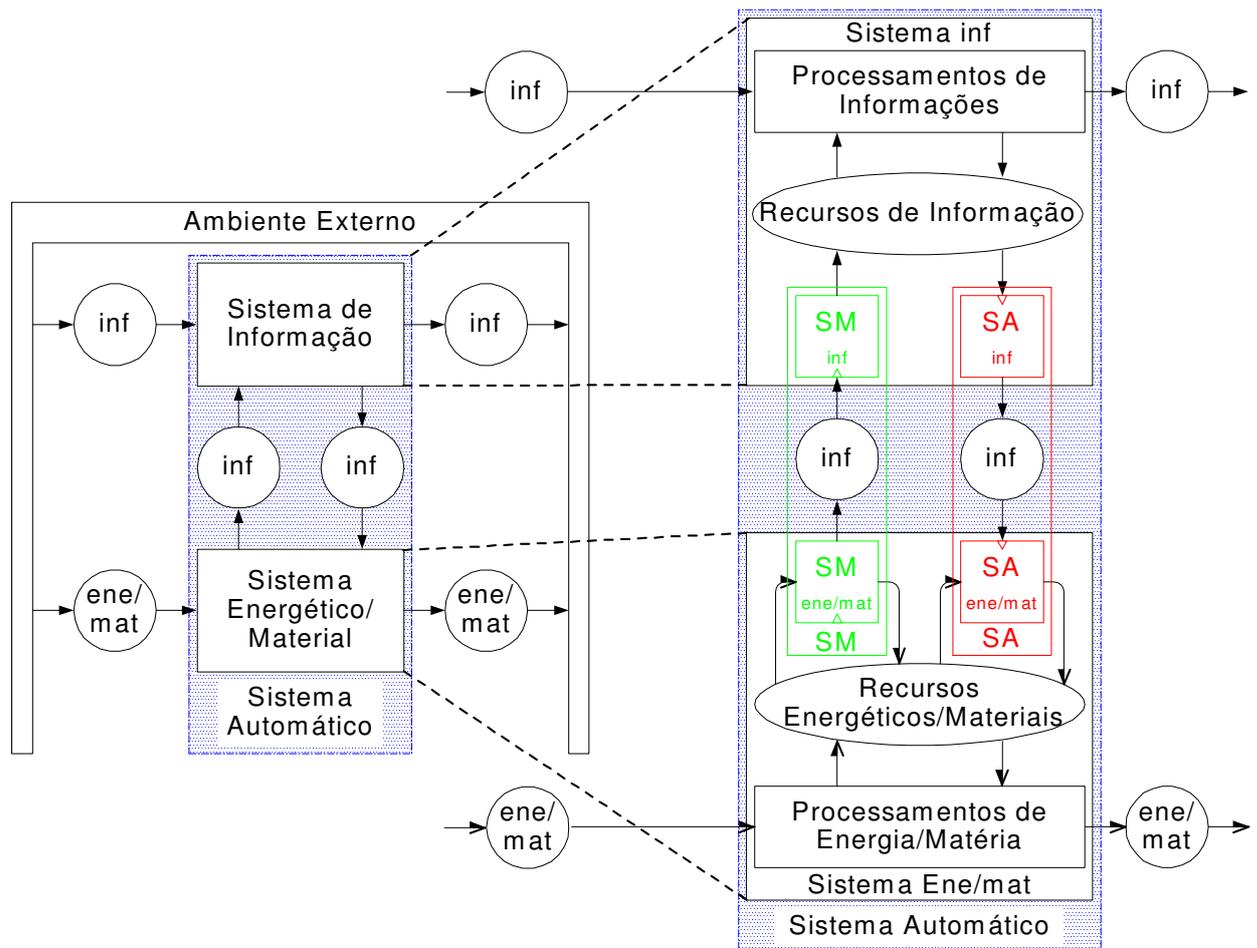


Figura 4.11. - Modelo funcional/estrutural geral e refinado de sistema automático (DE NEGRI, 1996).

Partindo-se da estrutura geral de um Sistema Automático (Figura 4.11), da parte que representa o Sistema Energia/Matéria, são descritas as partes funcionais e estruturais de uma usina hidrelétrica genérica, conforme Figura 4.12. Inicialmente é construída uma Rede C/A correspondente ao tipo de turbina a ser empregada. A seguir a rede da usina em si, desde a barragem até a geração de energia elétrica e saída de água à jusante. E identificados todos os sistemas de atuação (SA), medição (SM) e de atuação-medição (SAM). Identificados os subsistemas, verifica-se a necessidade de detalhá-los, ou seja, refiná-los de acordo com sua complexidade. Este passo dependerá da experiência e do discernimento do projetista e do nível de detalhamento pretendido, podendo optar por diferentes formas de representação. No primeiro caso, poderá continuar representando por Rede C/A. Outra possibilidade é representar o sistema através de diagramas (mecânico ou elétrico) próprios da área de implementação e, portanto, amigáveis aos profissionais que irão executar a tarefa.

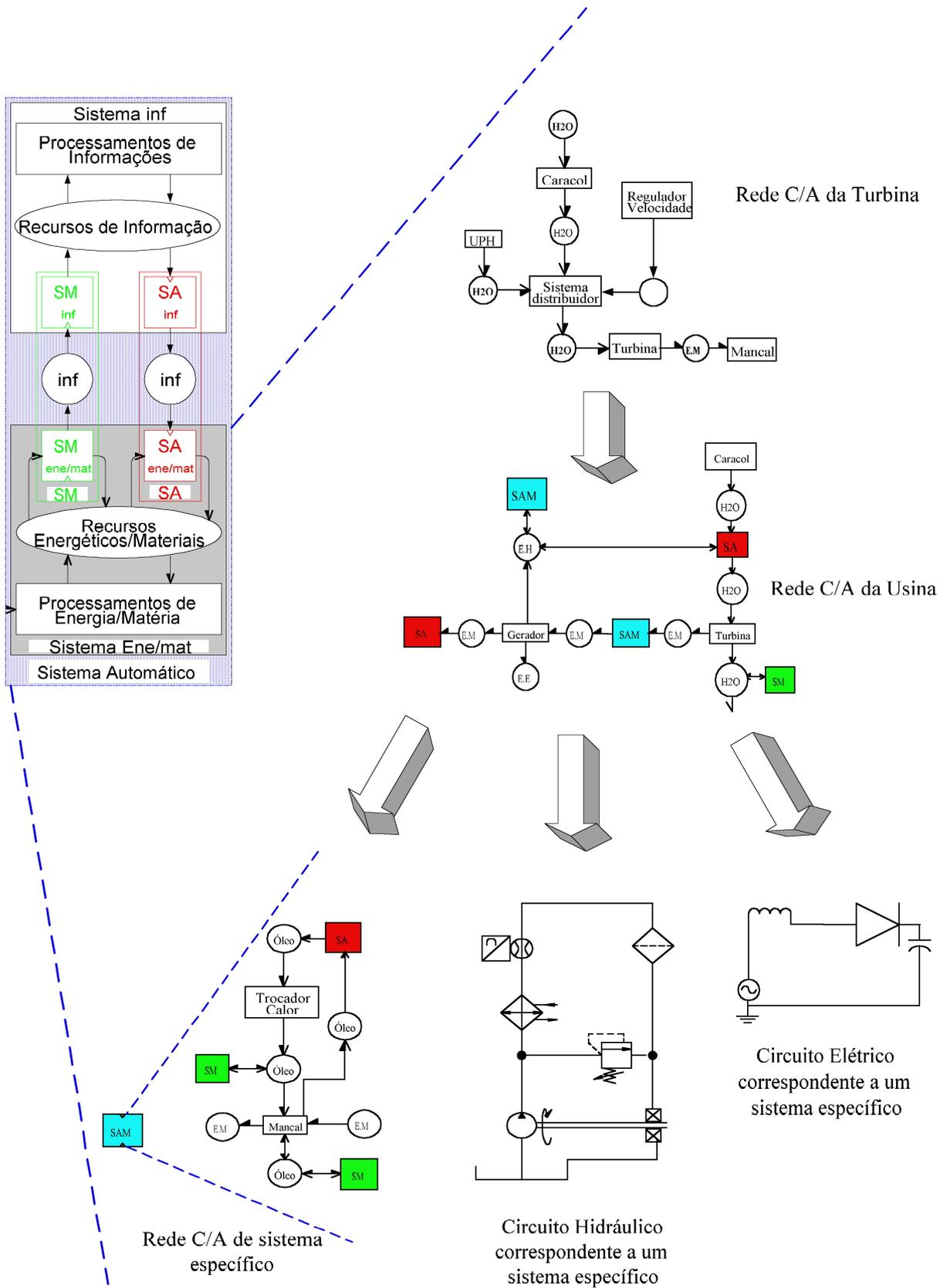


Figura 4.12 – Encaminhamento da sistematização do Sistema Energia/Matéria.

Em seguida, na Figura 4.13 realiza-se a decomposição da parte de informação do sistema automático. Representando por uma Rede C/A o Supervisor que comanda os subsistemas que compõe o funcionamento da usina e os canais que interligam estes subsistemas. A partir desta rede são construídos os Grafcet's hierarquizados dos Coordenadores que representam o comportamento do sistema e o diagrama de Caso de Uso que fará a ponte de ligação entre as representações físicas e a construção do software que comanda o sistema. Com base nos Grafcet's de cada um dos Coordenadores, cada Caso de Uso dá origem a um diagrama de Seqüências. Através das mensagens que chegam a cada um dos Objetos nos diagramas de Seqüências e na estrutura do diagrama de Caso de Uso, é construído o diagrama de Classes. Por fim, constrói-se o programa (código fonte).

Vale ressaltar que as figuras mencionadas mostram uma visão geral do encaminhamento da sistematização, os diagramas detalhados e reais empregados na modelagem da usina são mostrados no capítulo 6.

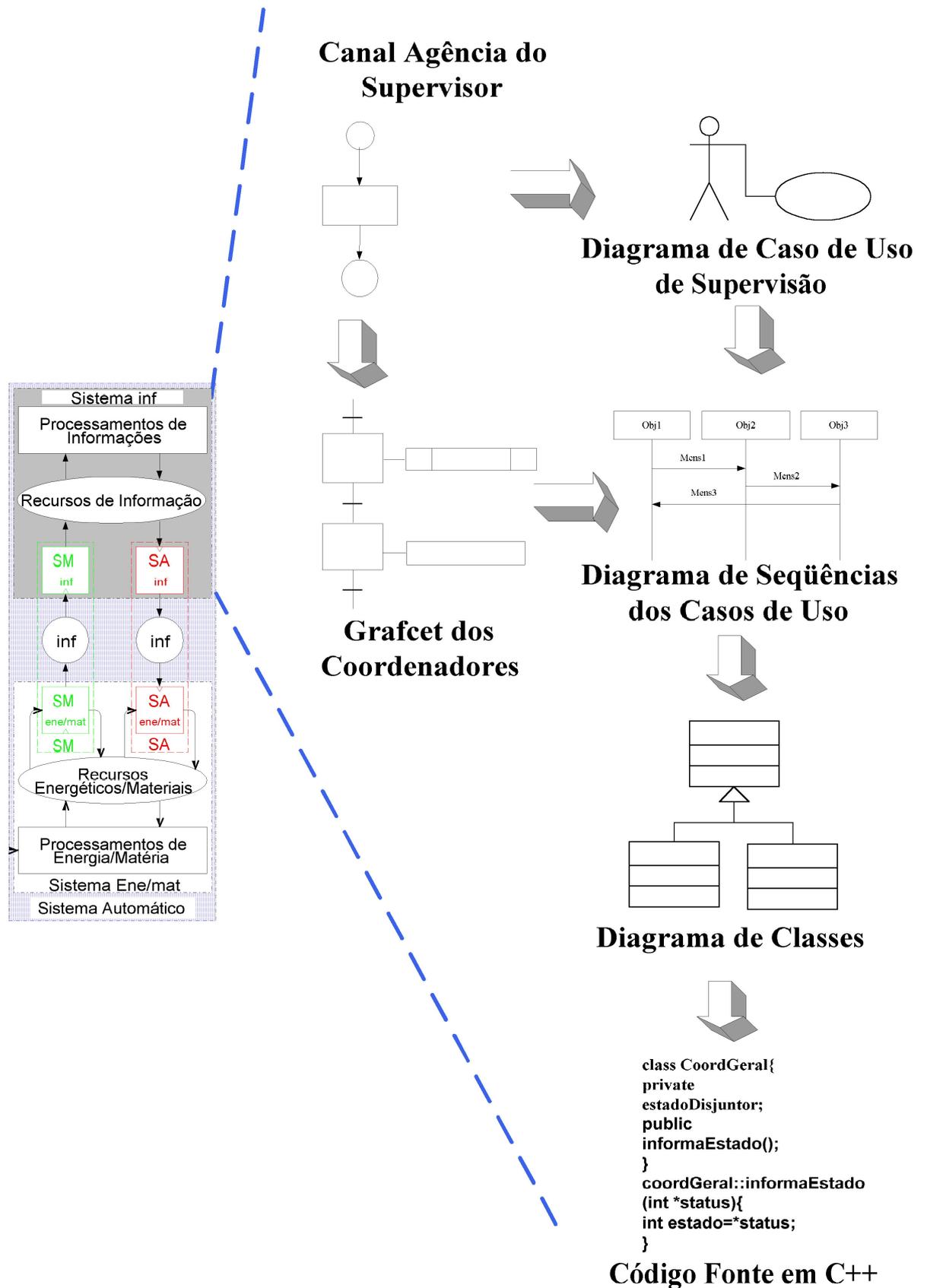


Figura 4.13 - Encaminhamento da sistematização do Sistema de Informação em: Rede C/A, Grafcet, Diagramas de Caso de Uso, de Seqüência e de Classe e Código.

CAPÍTULO V

DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS FÍSICOS DA PCH

5.0 EQUIPAMENTOS HIDROMECAÑICOS NAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS

Na Figura 5.1 é apresentada uma usina hidrelétrica de grande porte, a binacional de Itaipu (ITAIPU, 1998) que utiliza turbinas tipo Francis. O objetivo é mostrar uma visão geral de usina e identificar equipamentos, partes constituintes e suas disposições. Como definido na seção 2.1, o que caracteriza uma PCH é, em especial, a potência instalada e não obras civis e dimensões dos equipamentos utilizados.

No item 5.1 são apresentados os principais tipos de turbinas empregadas em usinas hidrelétricas. No item 5.2 são mostrados e descritos os equipamentos, dispositivos elétricos e mecânicos bem como os subsistemas constituintes das PCH's. No item 5.3 são discutidos os critérios que norteiam a escolha do tipo de turbina.

01 - Fundação da barragem;

04 - Sistema de excitação, acesso à carcaça do gerador e regulador de velocidade;

05 - Transformadores elevadores;

06 - Piso dos geradores e salas de controle local;

07 - Sistema de ventilação;

08 - Galeria de cabos;

10 - Painéis principais do serviço auxiliar AC e sala dos geradores diesel;

11 - Serviço auxiliar da barragem;

12 - Central hidráulica das comportas.

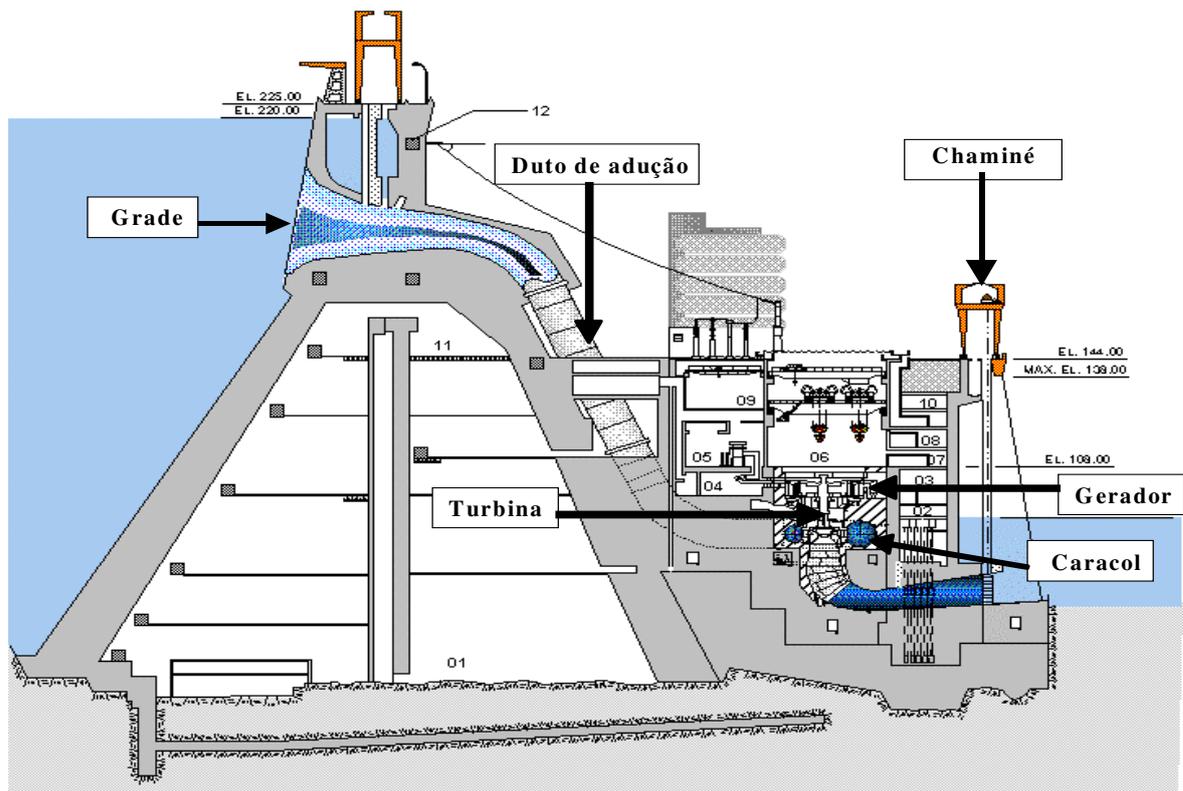


Figura 5.1 - Vista em corte de central hidrelétrica que usa turbina Francis (ITAIPU, 1998).

5.1 TURBINAS HIDRÁULICAS

As turbinas hidráulicas empregadas nas centrais hidrelétricas são de duas classes: as de ação e as de reação. As primeiras têm como principal expoente as turbinas Pelton. Nestas, a água atua sobre o rotor por meio de uma ou várias direções tangenciais. Na de reação, tipo Francis, a água chega radialmente e nas Axiais, como as Kaplan, chega axialmente sobre o rotor. Este tipo de turbina ao ser atravessada pela água é desviada em ângulo reto para descarregar no sentido paralelo ao eixo de rotação.

A seguir, será apresentada uma visão detalhada destas duas classes de turbina. Com ênfase maior para as de reação, em especial a Francis, por ser o tipo utilizado na usina que foi modelada neste trabalho.

Nas representações das turbinas inicia-se a abordagem apresentando uma figura esquemática ilustrando as partes constituintes e, em seguida, é apresentada uma Rede C/A básica correspondente a cada uma. Estas ilustrações são importantes em um primeiro momento, principalmente para aqueles não familiarizados com a área, pois se tem a idéia real de uma turbina, não sendo necessário enfatizar detalhes. Esta representação não descreve como se dá

o fluxo de recurso pela central hidrelétrica. Avançando no desenvolvimento do projeto, é preciso ter uma visão diagramática formal, pois o projetista necessita ater-se a detalhes. Neste instante, emprega-se a representação através das Redes C/A, pois estas têm o compromisso de serem formais e identificam os principais componentes em seus detalhes e suas conexões, em um nível de refinamento determinado pelo projetista. Estas características são as principais vantagens ao empregar as redes C/A, já que são formais e bastante legíveis para os vários perfis profissionais, podendo-se associá-las instantaneamente a desenhos e fotografias.

5.1.1 Turbinas Francis

Entre os diversos elementos da turbina Francis destaca-se o caracol, cuja função é conduzir radialmente a água oriunda da barragem para seu interior. Sua seção transversal variável, inicialmente maior, vai reduzindo conforme se aproxima ao rotor. A finalidade é aumentar a energia cinética no rotor de maneira a propiciar que a maior parte da energia potencial proveniente da queda d'água seja transformada em energia mecânica na turbina. Na saída da turbina há o tubo de sucção onde a seção transversal é significativamente maior que a da entrada para que a água, ao deixar a turbina, tenha uma energia cinética compatível com a velocidade da água do rio. Se assim não fosse, a energia seria dissipada no momento do encontro das águas. Portanto, a finalidade do tubo de sucção com maior seção transversal é permitir a recuperação eficiente da energia na velocidade que sai da turbina, de modo que a eficiência da mesma seja maximizada, chegando a 94-95% segundo MACINTYRE (1983). Como mencionado anteriormente, estas turbinas são do tipo reação e, além disso, também são de ação total pois a água atua simultaneamente em todos as pás do rotor. Quando são de média a grande dimensões, existe ainda um pré-distribuidor. As montagens podem ser com a turbina na vertical ou horizontal e o que diferencia entre tais disposições são os tipos de apoios solicitados por cada uma das montagens. Na Figura 5.2, é mostrada uma turbina Francis disposta verticalmente. Esta figura evidencia as dimensões do Caracol, Anel Distribuidor, Rotor, demonstrando o papel do servomotor que age no anel através do Guia de Operação. O anel está ligado às pás guias que, por sua vez, conduz a água em direção às pás do rotor, fazendo-o girar.

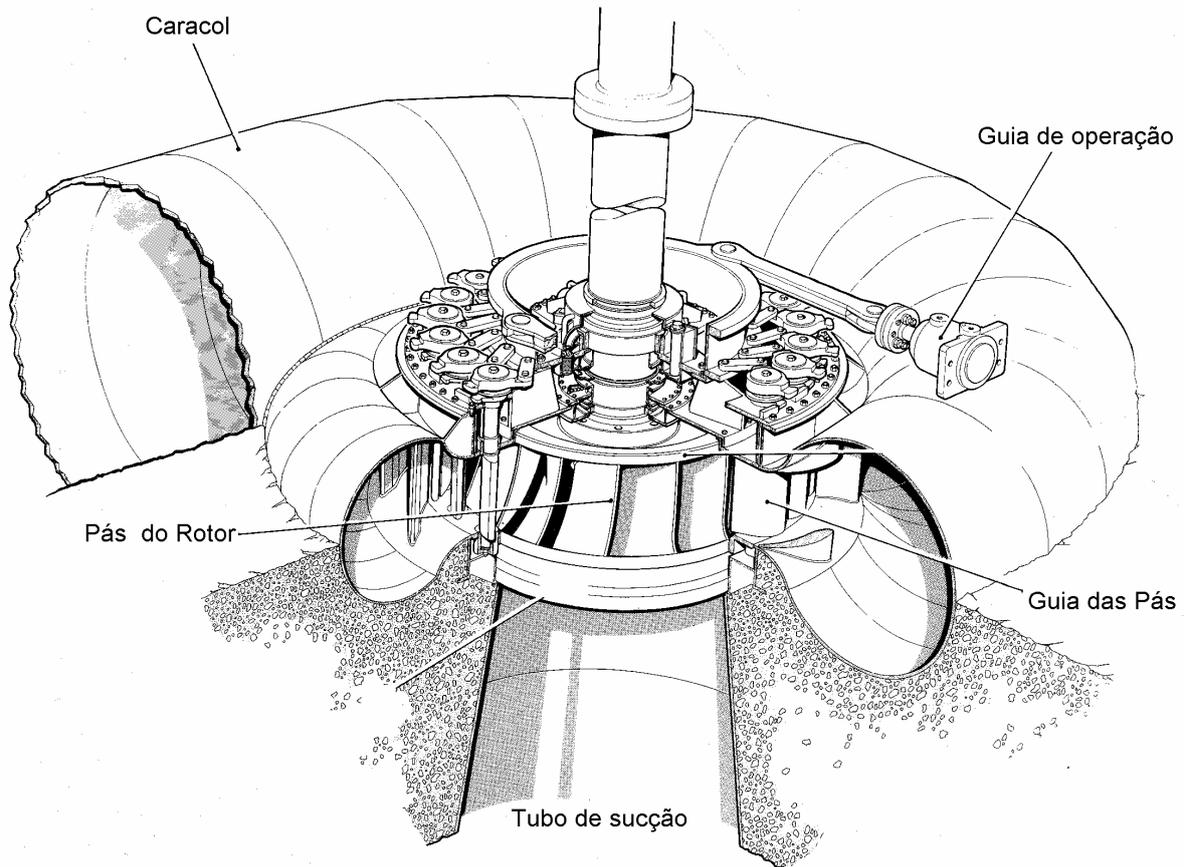


Figura 5.2 - Turbina Francis disposta verticalmente (LITTLER, 1996).

Na Figura 5.3, a seguir, é apresentada a vista explodida de uma destas turbinas, detalhando suas partes construtivas. Entre as partes mais importantes, destacam-se: o servomotor, a roda e o sistema espiral. As dimensões cotadas na figura referem-se a uma turbina de grande porte sendo que, para as de pequeno porte, como é o caso das utilizadas na PCH's, não há o pré-distribuidor.

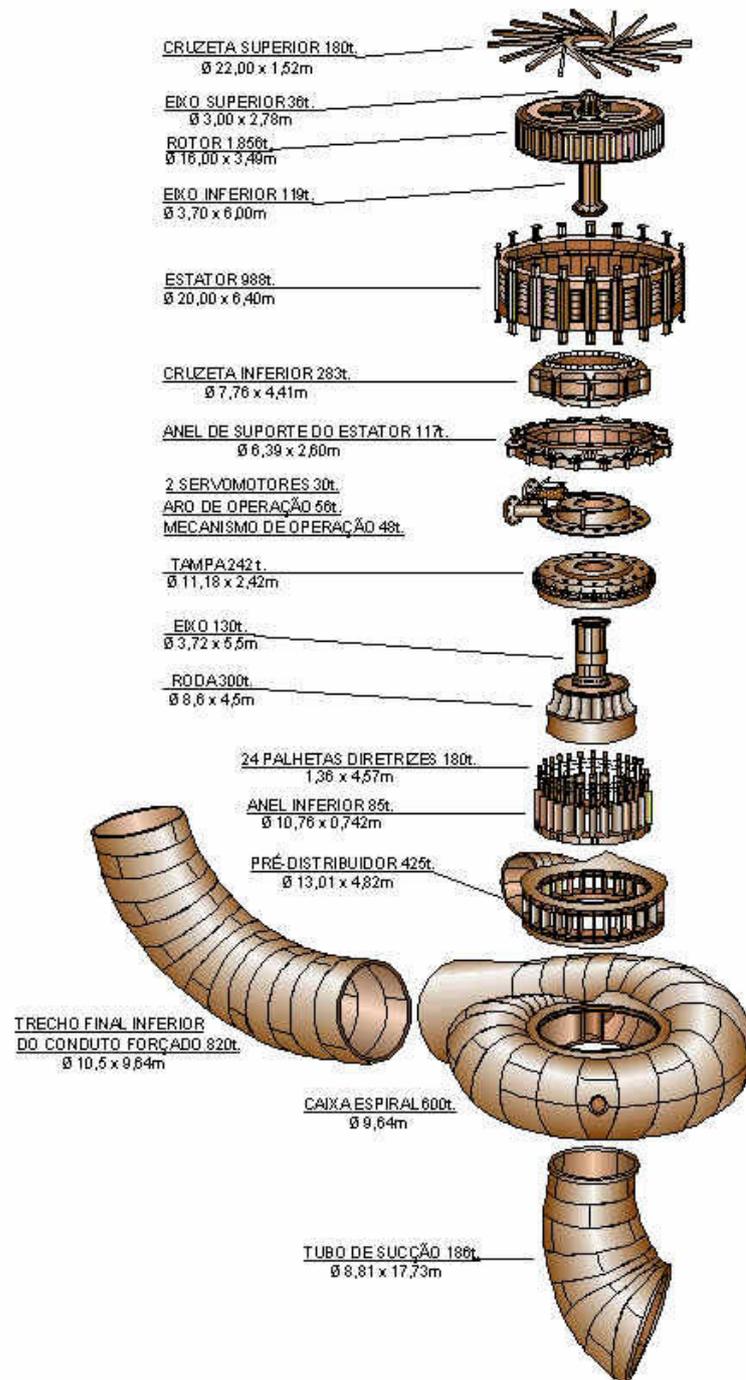


Figura 5.3 - Vista explodida de turbina Francis de grande porte (ITAIPU, 2001).

Partindo de uma descrição diagramática, como visto nas Figuras 5.2 e 5.3, pode-se chegar a uma descrição formal utilizando as Redes C/A, conforme apresentado na Figura 5.4. Antes de mostrar os subsistemas que compõem as PCH's é preciso configurar o papel da barragem, como participante do sistema. Trata-se de uma área inundada onde a água é represada, direcionada e forçada a passar por um duto (forçado), depois de ultrapassar a grade de proteção.

O sistema de canalização de água é responsável por conduzir a água contida na barragem até a entrada da turbina e também da saída da turbina até a descarga no leito do rio, à jusante da usina. Cada turbina possui canalizações de entrada e de descarga, configuradas de acordo com o seu tipo, conforme serão descritas em seções posteriores.

O sistema de conversão de energia hidráulica em energia mecânica é o que apresenta maior complexidade. Este sistema engloba a turbina propriamente dita e a parte de transmissão de energia mecânica para o gerador.

Macroscopicamente o eixo é considerado um elemento mecânico de transmissão de energia e não mereceria maiores atenções. No entanto, observado com maior cuidado, o eixo mecânico apresenta diversos detalhes que devem ser levados em consideração no processo de automação da usina. Primeiramente, é do eixo que se obtém a informação de rotação do conjunto. Além disso, possui mancais que por operarem com valores de força elevados devem ser monitorados. Ao todo serão considerados três mancais para cada sistema de geração de energia, sendo dois para contenção de esforços radiais e um para esforços axiais, este último é chamado mancal de escora. Cada um possui sistema de lubrificação e trocador de calor para resfriamento do óleo. O sistema de lubrificação consiste em reservatório de óleo, sensores: vazão, nível e temperatura do óleo e a bomba que o faz circular. O trocador de calor é formado por uma serpentina que passa por dentro do óleo e utiliza a água proveniente do caracol para o resfriamento.

O sistema de conversão de Energia Mecânica/Elétrica é composto basicamente por: gerador, disjuntor e barramento elétrico, que não serão detalhados neste trabalho. No gerador a energia de entrada é a mecânica na forma de torque e rotação através do eixo. Na saída tem-se energia elétrica com frequência e tensão reguladas para o barramento, que por meio do disjuntor será ligado à rede elétrica.

A potência elétrica gerada é função da potência mecânica transmitida pelo eixo sendo este um dos principais itens controlados pelo sistema de automação.

O Sistema Distribuidor é um conjunto de pás ou aletas, que são receptores dispostos radialmente em torno do rotor. Estas pás, que são móveis, podem ser orientadas por meio de

um comando especial, controladas pelo atuador hidráulico (servomotor). Sua função é direcionar a água que chega através do caracol, mudando o ângulo de entrada em relação às pás do rotor. O objetivo é dar para cada valor da descarga, o ângulo mais conveniente de entrada da água no receptor, propiciando um escoamento com um mínimo de perdas hidráulicas. Todas as pás possuem um eixo de rotação paralelo à turbina e, graças ao mecanismo constituído por um anel concêntrico ao distribuidor e ligado às pás por bielas, podem girar simultaneamente de um mesmo ângulo, fazendo a seção de escoamento variar de um máximo (admissão máxima) até o fechamento total. Com isto, pode-se controlar a potência transferida da água ao rotor, controlando a potência gerada pela turbina.

O rotor é o elemento central da turbina, responsável por transformar a energia hidráulica contida na água em energia mecânica. É constituído de pás fixas que possuem determinada curvatura cuja função é mudar a direção do fluxo da água. O rotor realiza a conversão de energia através da variação do momento de inércia da água que passa através dele. Embora haja um só caracol, o rotor é formado por dois conjuntos de pás fundidas em um só corpo rígido e apresenta duas saídas ou duas descargas de água. A rotação e o torque gerados no rotor são transmitidos para os processos seguintes através de um eixo.

Na Figura 5.4, destacando nas partes pontilhadas, os sistemas mencionados. As interligações são realizadas através de diferentes tipos de Canais, a saber:

- Matéria: Água, óleo hidráulico e cabo elétrico;
- Energia: Mecânica, hidráulica e elétrica;
- Informação: Cabo elétrico.

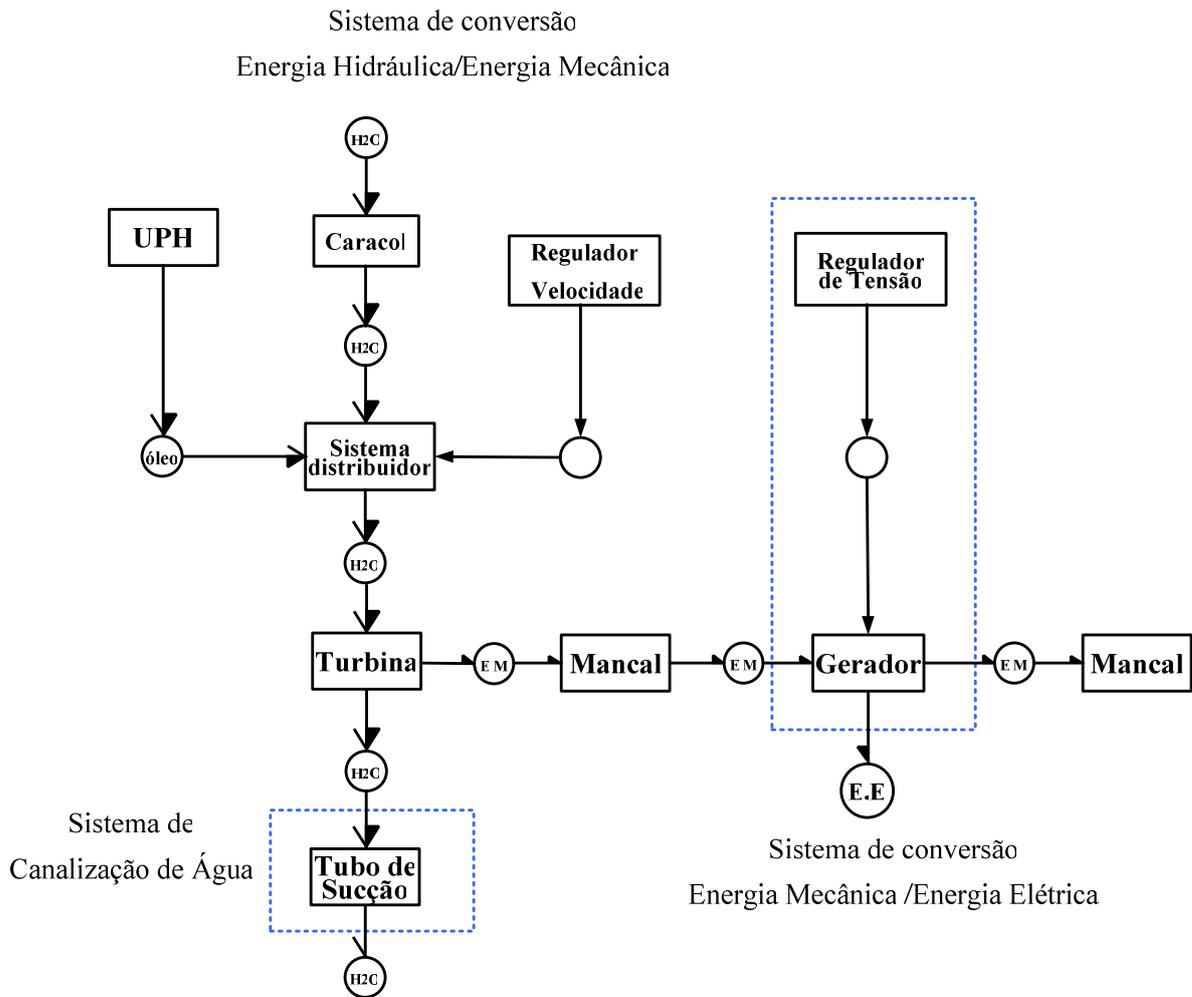


Figura 5.4 - Rede C/A genérica de usina usando Turbina Francis

As Atuações do sistema automático referem-se principalmente à operação da parte mecânica dos sistemas de geração de energia. Entenda-se por parte mecânica os sistemas de canalização, conversão de energia hidráulica/mecânica e conversão de energia mecânica/elétrica.

Com exceção do disjuntor, todas as atuações aqui consideradas são realizadas através de atuadores hidráulicos de duplo efeito. Dependendo da aplicação, estes atuadores podem ter controle proporcional.

A Unidade de Potência Hidráulica (UPH) gera energia para os sistemas de atuação da turbina. No entanto, considera-se a operação da UPH como um processo transparente para o sistema automático, visto que há equipamentos desenvolvidos e acessíveis para realizar esta tarefa.

5.1.2 Turbinas Axiais

Estas turbinas podem ser de pás fixas, chamada Propeller ou de pás variáveis, as Kaplan. Estas últimas mostram-se superiores as primeiras devido a sua flexibilidade diante da variação de cargas, sem comprometer o rendimento. Por esta razão serão estas as abordadas no trabalho. As turbinas Kaplan, também conhecidas como do tipo hélice, têm o princípio de funcionamento parecido com às Francis, diferindo, essencialmente em razão do ângulo de incidência da água sobre o rotor que é axial, ao invés de radial. Na Francis são movimentadas as aletas do distribuidor e na Kaplan, além destas, também são movimentadas as pás do rotor que, por sua vez, precisam de mais energia dos servomotores que movimentam as aletas do distribuidor. O rotor da turbina Kaplan assemelha-se ao de um navio cujas hélices, tipicamente entre 4 a 6, são ajustáveis para apresentar um ângulo ótimo. Esta capacidade de otimizar o desempenho do rotor possibilita manter um eficiência de cerca de 94%, mesmo tendo uma grande variação de velocidade e potência de saída. A Figura 5.5 representa esquematicamente a turbina Kaplan evidenciando suas principais partes construtivas. A literatura trata indistintamente os termos Caracol e Sistema espiral, dando-lhe o mesmo sentido. A instalação deste tipo de turbina é usualmente na vertical (LITTLER, 1996).

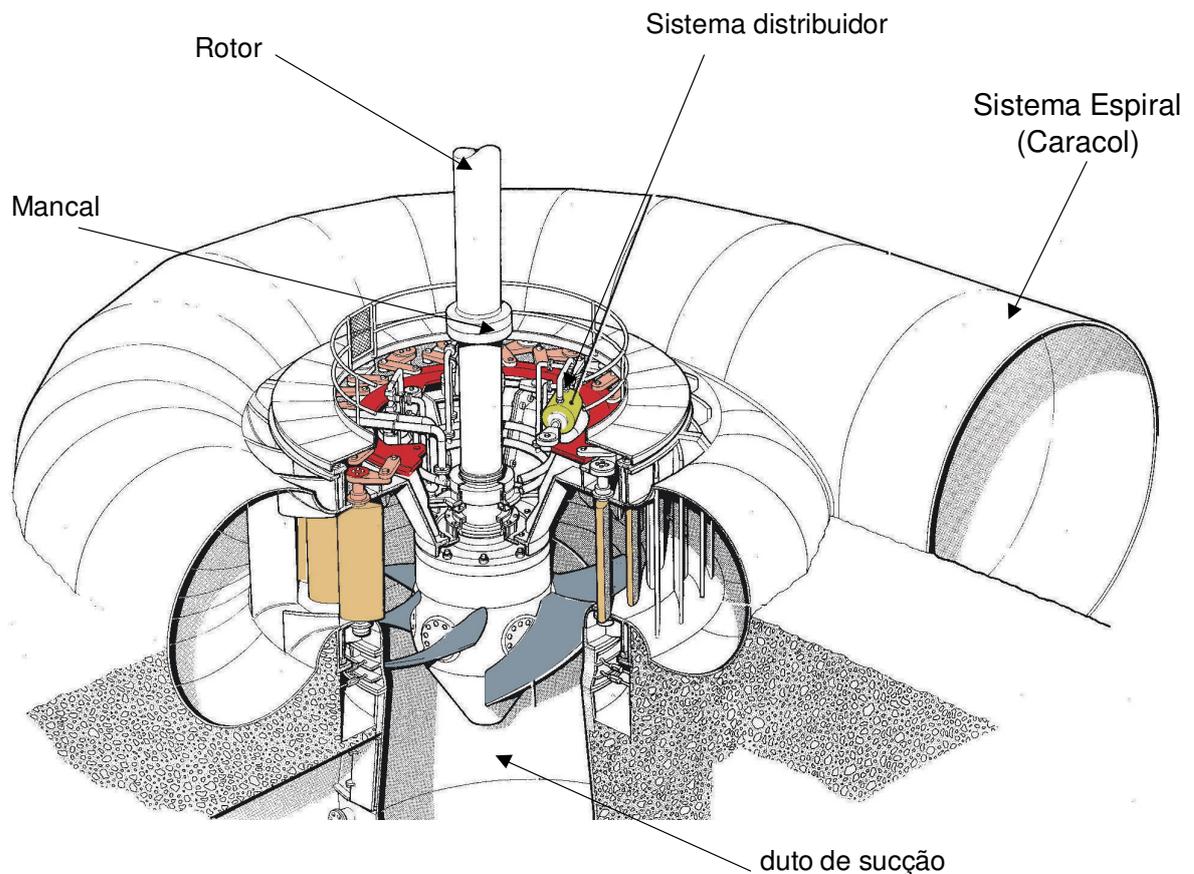


Figura 5.5 - Turbina Kaplan (LITTLER,1996).

A Figura 5.6 representa diagramaticamente, usando rede C/A, os equipamentos de uma usina que utiliza turbina Kaplan. Documentam o fluxo de energia/matéria e dos sinais de informação envolvidos no funcionamento da turbina.

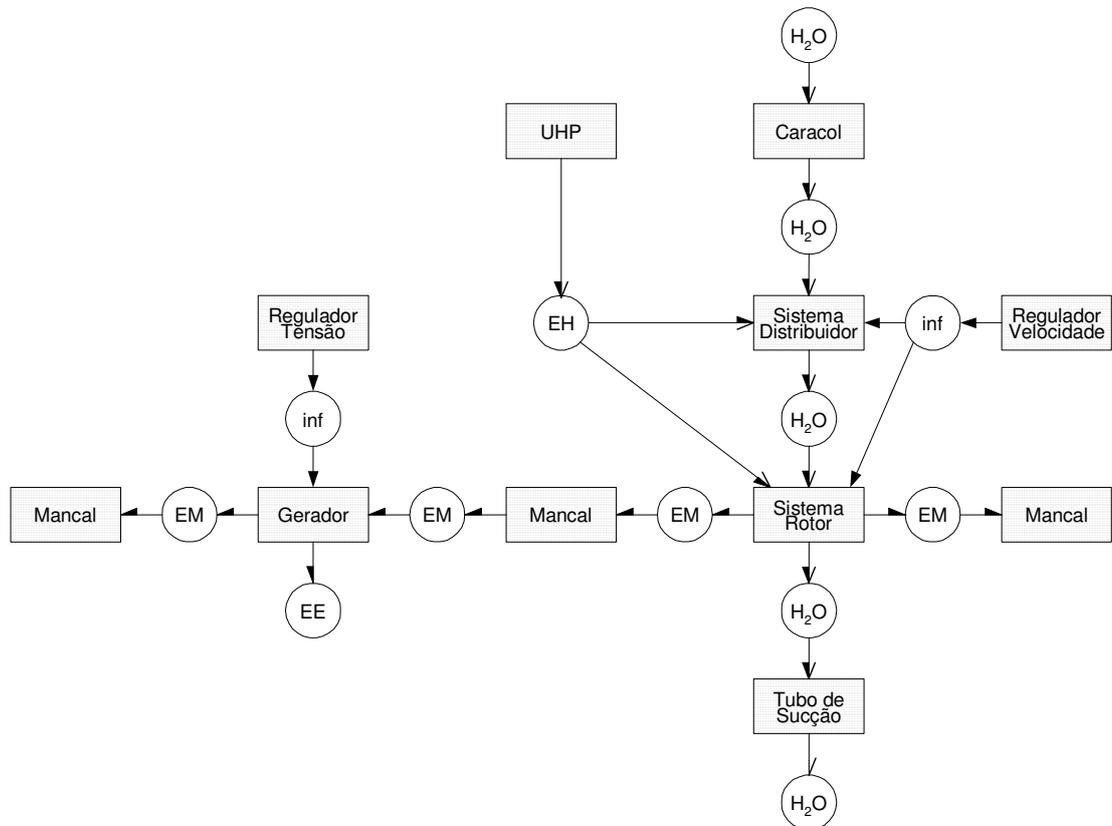


Figura 5.6 - Rede C/A genérica de usina que utiliza Turbina Kaplan.

5.1.3 Turbinas Pelton

Esta turbina é classificada como de ação, pois os bicos injetores (bocais) agem regulando o volume d'água que incide sobre as pás (conchas) do rotor, controlando sua velocidade.

Os bicos injetores ou bocais são constituídos por um sistema de agulhas que regulam e direcionam o fluxo da água de forma apropriada, proporcionando um jato cilíndrico sobre a pá que funciona como um receptor, fazendo o rotor girar. Conforme mostrado no Figura 5.7, o receptor é formado por um certo número de pás com a forma de concha especial, dispostas na periferia de um disco que gira preso ao eixo. A pá possui um gume médio, que fica sobre o plano médio da roda, dividindo simetricamente o jato, desviando-o lateralmente.

Este tipo de turbina possui também um defletor de jato que intercepta o jato, desviando-o das pás, quando ocorre uma diminuição violenta na potência demandada pela rede de energia. Caso isto ocorra, uma atuação rápida da agulha reduzindo a descarga poderia provocar uma sobre pressão no bocal, nas válvulas e ao longo do encanamento adutor. O defletor volta à

posição primitiva liberando a passagem do jato logo que a agulha assume a posição que convém para a descarga correspondente à potência absorvida. Em alguns casos, o defletor fica acompanhando o perfil do jato, conjugando a sua posição.

As Pelton de potência elevada possuem ainda um bocal de frenagem que faz incidir um jato nas costas das pás, no sentido contrário de rotação, quando se deseja frear a turbina rapidamente (MACINTYRE, 1983).

A facilidade de adotar vários limites de velocidade tangencial no rotor faz com que seja possível obter um número de rotações adequado, permitindo o acoplamento com o gerador obter uma frequência ótima de 50 ou 60 Hz.

Estas turbinas apresentam um excelente rendimento pelo fato de tornar mínima a perda por velocidade residual, sem que para isto as conchas sejam muito grandes. Isto também evita as perdas por atrito da água sobre estas conchas, já que são niqueladas e polidas, tornando-as perfeitamente lisas.

Idealmente, para maximizar a transferência de momento, o jato deve ser ajustado em 180° . A eficiência das Pelton é da ordem de 92% (MACINTYRE, 1983).

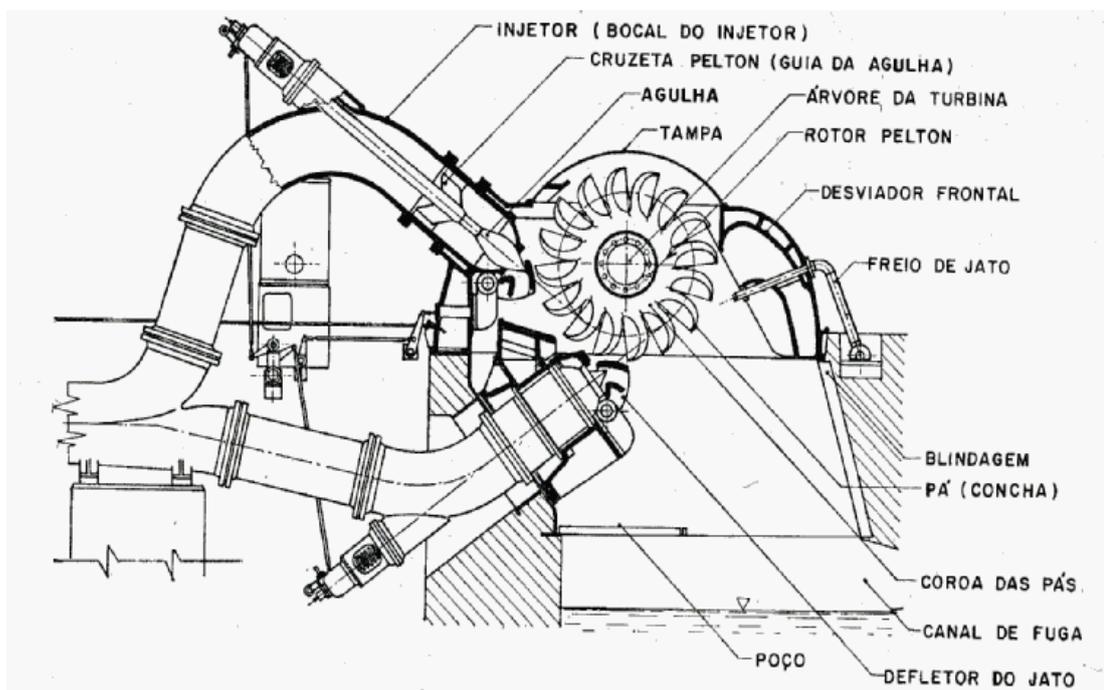


Figura 5.7 - Corte transversal de turbina Pelton de dois jatos (MACINTYRE, 1983).

Na Figura 5.8 é apresentada a Rede C/A para as turbinas Pelton. É importante acrescentar que após água alcançar o rotor, os fluxos de energia e matéria seguem caminhos similares aos das outras turbinas até a geração de energia elétrica.

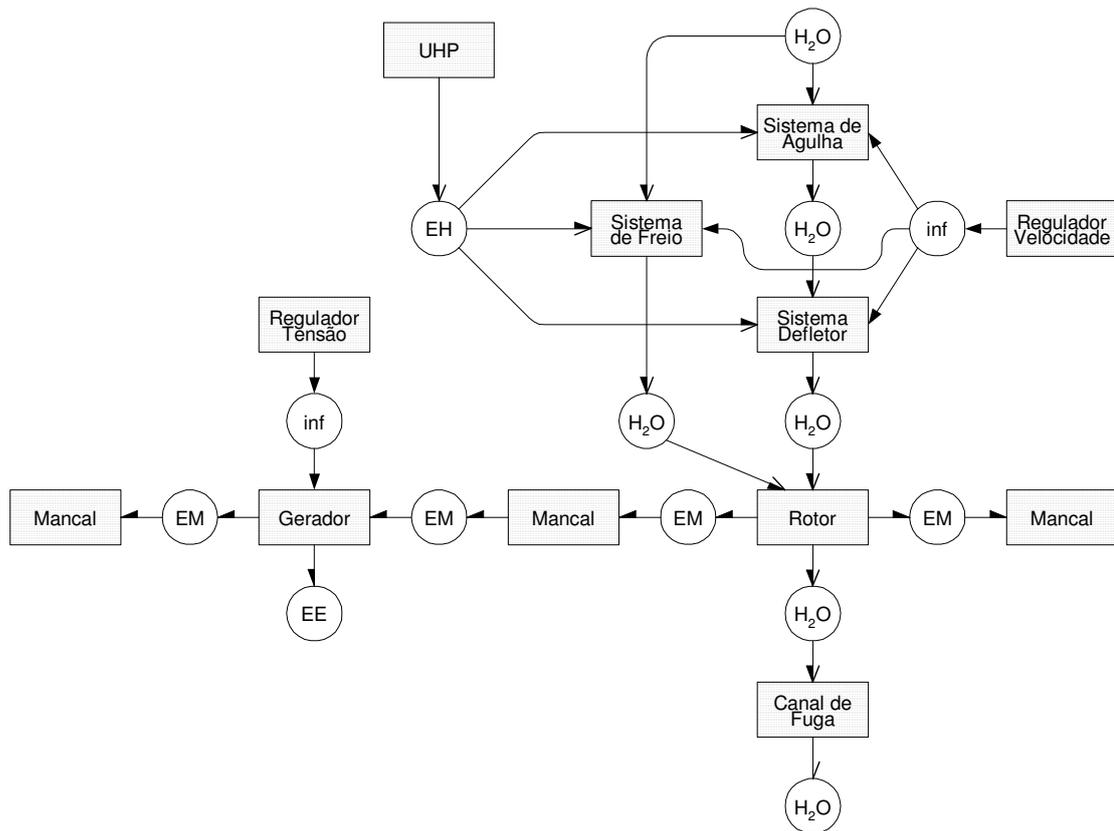


Figura 5.8. Rede C/A geral de usina com turbina Pelton

5.2 CRITÉRIOS PRELIMINARES PARA ESCOLHA DO TIPO DE TURBINA

A tecnologia e a experiência prática indicam procedimentos apropriados para cada conjunto de condições que definirão a escolha de determinado tipo de turbina. A decisão é feita principalmente pelos seguintes critérios: velocidade específica da máquina ou do número característico de rotações por minuto, os dados hidráulicos (queda d'água e vazão), combinados, determinam a potência total a ser gerada. Isto significa a existência de uma relação de compromisso entre duas das variáveis. Segundo (MOREIRA, 1998), a altura de queda permite a escolha de um tipo de turbina e de instalação (horizontal ou vertical):

☞ Queda > 150 m (instalação de alta queda):

A turbina utilizada neste caso será do tipo Pelton, com a utilização de geradores de velocidade de rotação elevada (superior a 1.000 rpm), cujas dimensões e, conseqüentemente o preço por kVA instalado, são sensivelmente mais baixos do que para as máquinas mais lentas.

☞ 15 m < queda < 150 m (instalação de queda média):

A turbina será do tipo Francis, com velocidades de rotação na faixa de 500 a 750 rpm;

☞ Queda < 15 m (instalação de baixa queda):

As turbinas serão do tipo Kaplan ou Hélice, com velocidades de rotação baixas (de 70 a 350 rpm).

Os números mencionados referentes às alturas têm o objetivo de dar uma ordem de grandeza, pois não há rigor, cada caso deve ser analisado nas suas particularidades. Em uma avaliação simplificada pode-se dizer que as turbinas Kaplan são empregadas quando existe um grande volume d'água e uma pequena queda; as Pelton são para grandes quedas e uma vazão pequena. E, por fim, as Francis estão classificadas numa faixa intermediária entre as outras duas.

Na Figura 5.9 compara-se o rendimento das turbinas em relação à altura de queda d'água, vazão e rotação.

5.2.1 Regulação

Como mostrado por VIANA e ALENCAR (1998) a rotação variável está relacionada às turbinas hidráulicas cujos rendimentos são menos sensíveis a variação da altura de queda e mais sensíveis a variação da vazão, tais como as turbinas do tipo Francis ou Kaplan, porque possuem uma variação mais rápida do rendimento com a variação da vazão, como é mostrado na Figura 5.9. Para a variação do rendimento total relativo ao rendimento máximo ($\eta_t/\eta_{t\text{máx}}$) em função da vazão da turbina relativa a vazão para o rendimento máximo (Q/Q_0), operando na rotação constante e igual a (η_0), para altura constante (H_0) para diferentes tipos de turbinas. Existem limites para a operação das turbinas hidráulicas quanto à variação da vazão, rotação e altura de queda, devido à cavitação nas pás e no tubo de sucção e a formação de vórtices na saída do rotor que podem provocar desgastes prematuros e vibração mecânica na máquina.

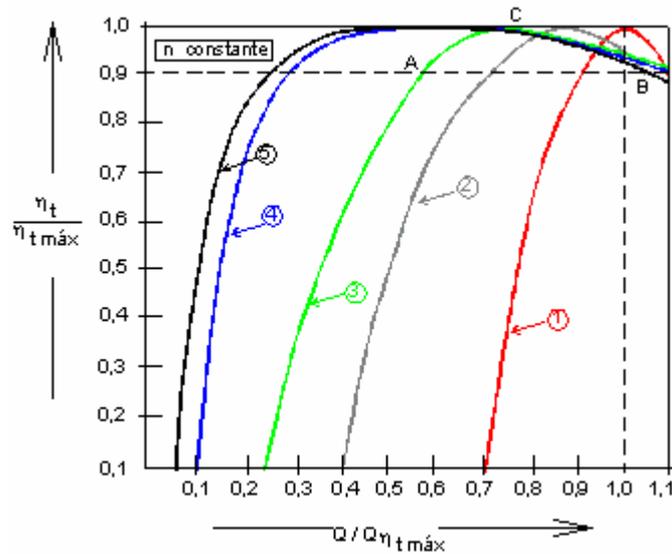


Figura 5.9 – Curvas de rendimento ($\eta_t/\eta_{t\text{MÁX}}$) em função da vazão ($Q/Q_{\eta_{t\text{MÁX}}}$) para a rotação n_0 e altura de queda H_0 constantes. Hélice-1, Kaplan-2, Francis rápida-3, Francis lenta-4, Pelton-5 (TENOT, 1932 citado por VIANA e ALENCAR, 1998).

Por razões diversas, a energia elétrica é consumida sob forma de corrente alternada (C.A). O mercado, cada vez mais exigente, requer esta energia com frequência estável. Os limites de variação de frequência ao redor da frequência nominal devem ser mínimos. Para conseguir valores constantes, é necessário que as máquinas que produzem energia elétrica mantenham rotação constante. Para tanto, a turbina hidráulica, seja qual for o seu tipo ou disposição, tem um sistema de regulação incorporado, formado por: medidor, regulador e o órgão de controle, que controlará a sua potência.

Há muitas semelhanças entre os três tipos de turbina no que diz respeito às suas necessidades de controle da velocidade, para este fim é utilizado o Regulador de Velocidade (RV). O que vai distingui-las no contexto da automação é onde esse dispositivo de controle vai atuar. Nas Pelton irá controlar a abertura e fechamento das agulhas que permitem a passagem da água que irá atingir as conchas, fazendo a turbina girar com maior ou menor velocidade. Nas Kaplan, devido às suas características especiais, necessita de dois controladores. Um para controlar as pás móveis, cuja posição é função da abertura do distribuidor e da queda d'água. Para cada posição há uma posição definida das pás do rotor, onde atua o outro controlador, de modo a obter sempre o máximo rendimento. As turbinas Francis têm apenas um controle que age no anel distribuidor provocando a abertura para a passagem da água em direção ao rotor da máquina.

Segundo ZENI (1995), o Regulador de Tensão (RT) controla a corrente de excitação que circula no campo elétrico do gerador de modo a:

- Manter a tensão nominal da máquina no valor definido pelo operador ou em uma determinada relação entre a tensão e a carga reativa em toda região de operação;
- Ser capaz de responder, com desempenho adequado aos comandos do operador ou sincronizador automático, quando da sincronização da unidade com o sistema;
- Ser provido de elevada velocidade de resposta de maneira a corrigir as variações de tensão de carga, geração ou por chaveamento do sistema.
- Estabilizar as oscilações eletromecânicas do gerador contra o restante do sistema.

CAPÍTULO VI

MODELAGEM DA PCH HERVAL

Nos capítulos anteriores deste trabalho foi mostrada a importância das PCH's no cenário nacional e suas perspectivas, bem como a viabilidade de implantação e as opções para sua modernização. Foram descritas algumas das partes principais constituintes destas centrais e também as ferramentas que podem auxiliar na descrição e documentação dos projetos. A intenção foi ressaltar a importância e até mesmo a necessidade de uma boa documentação no processo de automatização/modernização dos sistemas em geral. Nos sistemas mecatrônicos, em especial, é fundamental a utilização de uma metodologia e uma documentação adequada. Como o objetivo de comprovar a eficiência e eficácia da Sistematização do projeto de automação de Sistemas Mecatrônicos apresentada no capítulo 4, foi modelado o *retrofit* completo da PCH de Herval.

A central em questão é composta por duas unidades de geração de energia elétrica independentes. Cada uma destas é composta por três subsistemas principais: canalização de água, conversão de energia hidráulica em energia mecânica e conversão de energia mecânica em elétrica. Além disso, a central contém sistemas que são comuns a ambas as unidades de geração de energia. Estes sistemas são a unidade de potência hidráulica (UPH) e outros referentes à barragem, como vertedouro e medição de nível de água.

6.1 AUTOMAÇÃO, TELECOMANDO E MODERNIZAÇÃO DA PCH HERVAL

A modernização da Usina Hidroelétrica (UHE) de Herval, localizada no município de Santa Maria do Herval, no estado do Rio Grande do Sul, foi solicitada pela Companhia Estadual de Engenharia Elétrica (CEEE). A Usina foi posta em operação em 1941 e, em agosto de 2000, realizada uma automação completa. O processo de automatização foi feito por um consórcio de empresas capitaneadas pela REIVAX Automação e Controle Ltda. Para cada uma das consorciadas coube:

- ☞ CONENGE Controle e Automação Ltda.: projeto hidráulico e montagem;
- ☞ ALTUS Sistema de Informática S/A : projeto e programação de CLP's;
- ☞ REIVAX Automação e Controle Ltda.: Reguladores de Velocidade e Tensão.

Integração e gerenciamento.

Na automatização de centrais anteriores a Reivax utilizava Regulador de Velocidade (RVX200 ou RVX300) e Regulador de Tensão (RTX 300 ou RTX400), separadamente. Neste projeto utilizou, pela primeira vez, o RTVX 100 que é um regulador de velocidade e de tensão em uma mesma CPU.

6.2 CARACTERÍSTICAS DA USINA

Os principais equipamentos utilizados na PCH de Herval são:

302 turbinas tipo Francis, fabricadas por Escher Wyss.

Rotação: 10.000 RPM/50 Hz

Potência: 720 kW

Vazão: 0,77 m³/s

Entretanto, todo o estudo e modelagem realizada neste trabalho foi considerando apenas uma das turbinas. Todos os comentários, análises e conclusões são estendidos, naturalmente.

✓ Servomotor (atuador hidráulico)

✓ Gerador:

Fabricante: Siemens Schuckert

Potência: 900 kVA

✓ Excitatriz rotativa

Potência: 8,8 kW

Rotação: 1000 RPM

6.3 MODELAGEM FUNCIONAL/ESTRUTURAL E COMPORTAMENTAL

Observa-se pelo número de empresas consorciadas e, conseqüentemente, o número de profissionais de diferentes perfis envolvidos, a necessidade de adequada documentação de todas as informações manipuladas neste projeto de modo a minimizar problemas devido a:

- Dificuldade em gerenciar as decisões de projeto;
- Dificuldade em ter uma visão geral;
- Informações conduzidas por diversos profissionais, com o agravante de serem diferentes empresas;
- Risco de a informação não ser amplamente partilhado e de perda de documentos.

6.3.1 Aquisição do Conhecimento

Para documentar o processo de modernização foi realizado um levantamento de todo material descritivo e diagramático do projeto disponibilizado pelas empresas envolvidas, como os citados a seguir.

- ↳ Visão de projeto – REIVAX/ALTUS
- ↳ Manual de Especificação Técnica – REIVAX/ALTUS
- ↳ Regulador de Tensão e Velocidade RTVX 100 – Painel de Controle Hidráulico - REIVAX
- ↳ Esquemas Hidráulicos – CONENGE
- ↳ Especificação da Unidade Hidráulica - REIVAX
- ↳ Entrevistas técnicas com engenheiros – REIVAX E CONENGE
- ↳ Visita às Usinas Hidrelétricas, especialmente a de Herval. Na mesma oportunidade foram visitadas ainda, as PCH:
 - ↳ Bugres, que utiliza turbinas Francis disposta horizontalmente.
 - ↳ Canastra, cujas turbinas são do tipo Pelton.

6.3.2 Identificação e apresentação dos Subsistemas que compõem a Usina

Com base no material mencionado foram identificados todos os subsistemas que compõem a usina, cujas funções estão definidas no capítulo 5.

A seguir serão mostradas as fotografias da PCH de Herval, iniciando na barragem até o gerador de energia elétrica. O objetivo a partir de uma documentação fotográfica e chegar a uma diagramática, usando Rede C/A. Na Figura 6.1 é mostrada a barragem, a grade de proteção e o sensor de nível, que se encontra submersos. A grade na entrada da canalização tem a função de proteger o sistema de sujeiras ou entulhos trazidos pelo rio e estacionar na barragem.



Figura 6.1 – Barragem com grade de proteção submersa

A Figura 6.2 mostra o percurso do duto de condução forçada ao sair da barragem direcionando-se para casa de máquinas. A canalização da água é formada por um único duto com aproximadamente 1,0 metro de diâmetro que conduz a água através de uma decida de 119,5 m correspondendo à altura de queda. A Figura 6.3 mostra a Casa de Força e, em detalhe o duto.



Figura 6.2 - Percurso do duto forçado em direção à usina



Figura 6.3 - Vista externa da Casa de Força da usina, em detalhe o duto de adução.

Ao chegar na usina o duto divide-se em dois, cada uma com cerca de 50 cm de diâmetro, permitindo o suprimento das duas turbinas (Figura 6.4).



Figura 6.4 - Detalhe do duto de adução dividindo-se em dois, levando água às duas turbinas.

O Sistema de Conversão de Energia Hidráulica em Mecânica, conforme descrito pela Figura 5.4, é formada pelos seguintes equipamentos: turbina, caracol, anel distribuidor, pás (não mostradas), atuador hidráulico (servomotor), mancais, sistema de lubrificação e resfriamento dos mancais, freios etc. A Figura 6.5 destaca alguns destes equipamentos.

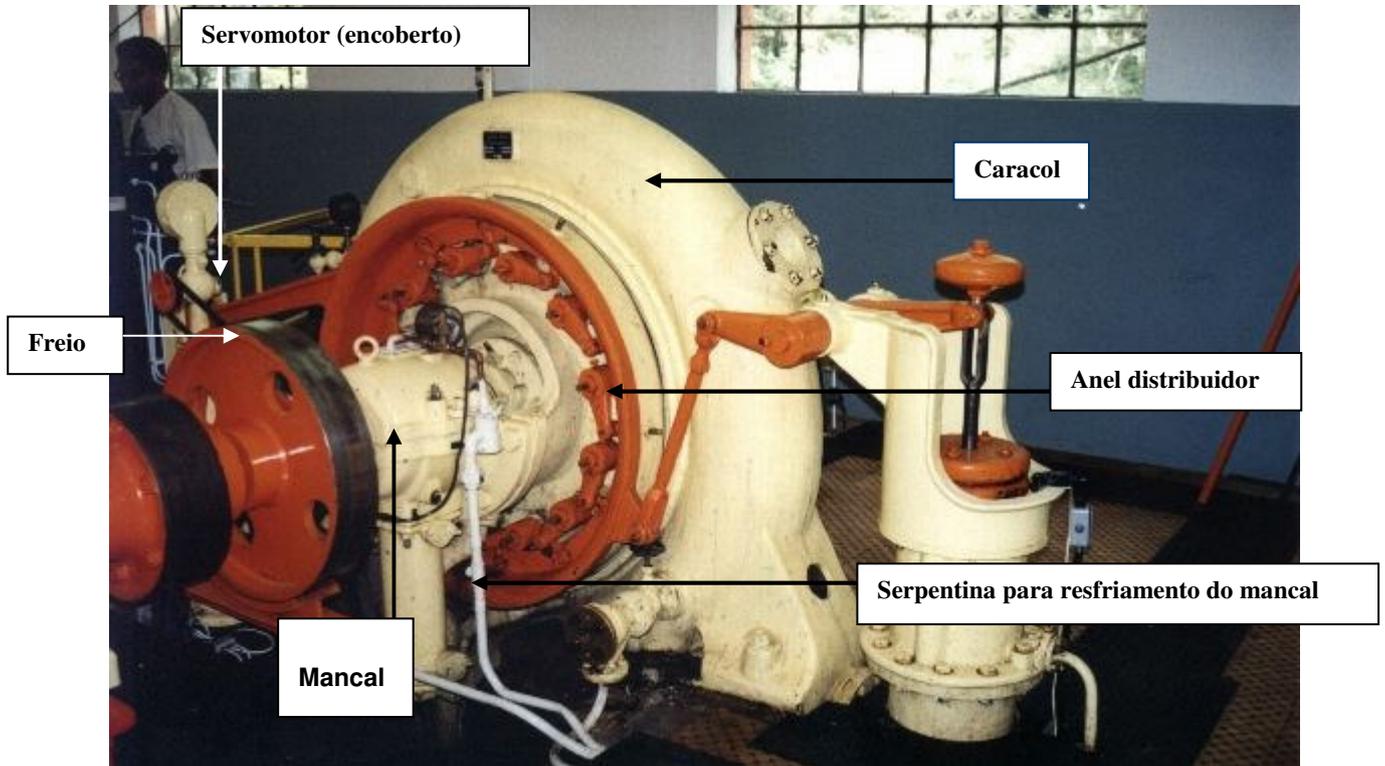


Figura 6.5 - Detalhes principais da turbina

Como mostrado na Figura 6.6 o Sistema de Conversão de Energia Mecânica em Elétrica é composto pelos seguintes equipamentos: dois conjuntos turbina/gerador, excitatriz dinâmica, eixo transmissor de torque (rotor), painel de controle, parte do poço de localização das válvulas de segurança e *by pass* localizadas na parte da tubulação junto à entrada da turbina. A válvula de segurança é a mais importante da tubulação e tem a função de permitir ou não o fluxo principal de água pela turbina. A válvula *by-pass* serve como auxiliar no processo de abertura da válvula de segurança, promovendo a pré-pressurização do Caracol para evitar um eventual golpe de ariete.

Em outros casos, alguns equipamentos são mantidos por uma questão estética e, às vezes saudosista. É o caso do sincronizador de frequência (frequencímetro), que antes era visual e supervisionado pelo operador. Agora, há um automático que dispensa a interferência humana.

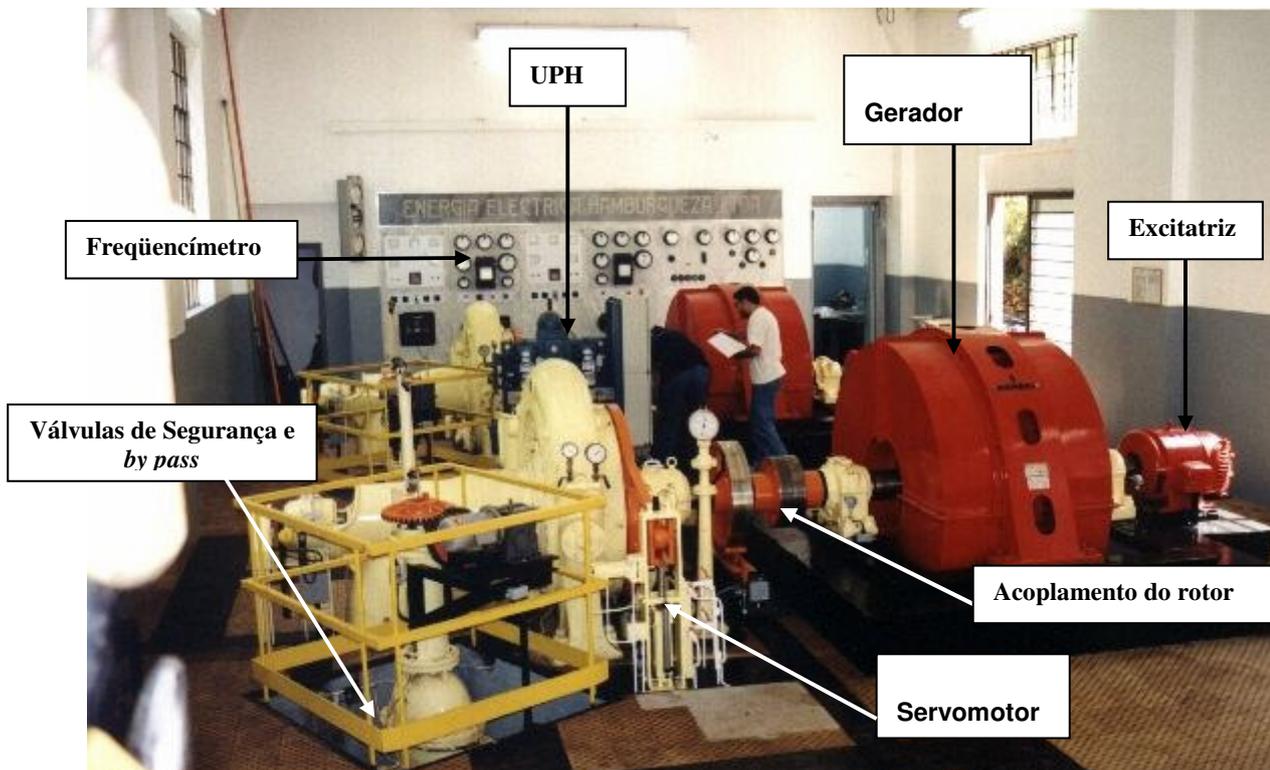


Figura 6.6 - Detalhes de equipamentos na Casa de Força

6.3.3 Modelagem do Fluxo de Energia/Matéria

Na Figura 5.4 foi apresentada uma visão geral da modelagem do fluxo de energia/matéria para usinas que empregam turbinas Francis. Nesta seção, foi realizada a modelagem detalhada deste mesmo tipo de central. Foram explorados os conceitos de Sistemas de Medição (SM), Sistemas de Atuação (SA) e Sistema de Atuação e Medição (SAM), definidos na seção 4.3. Para detalhar cada um destes sistemas, foram utilizadas as regras de refinamento e condensação das Redes C/A.

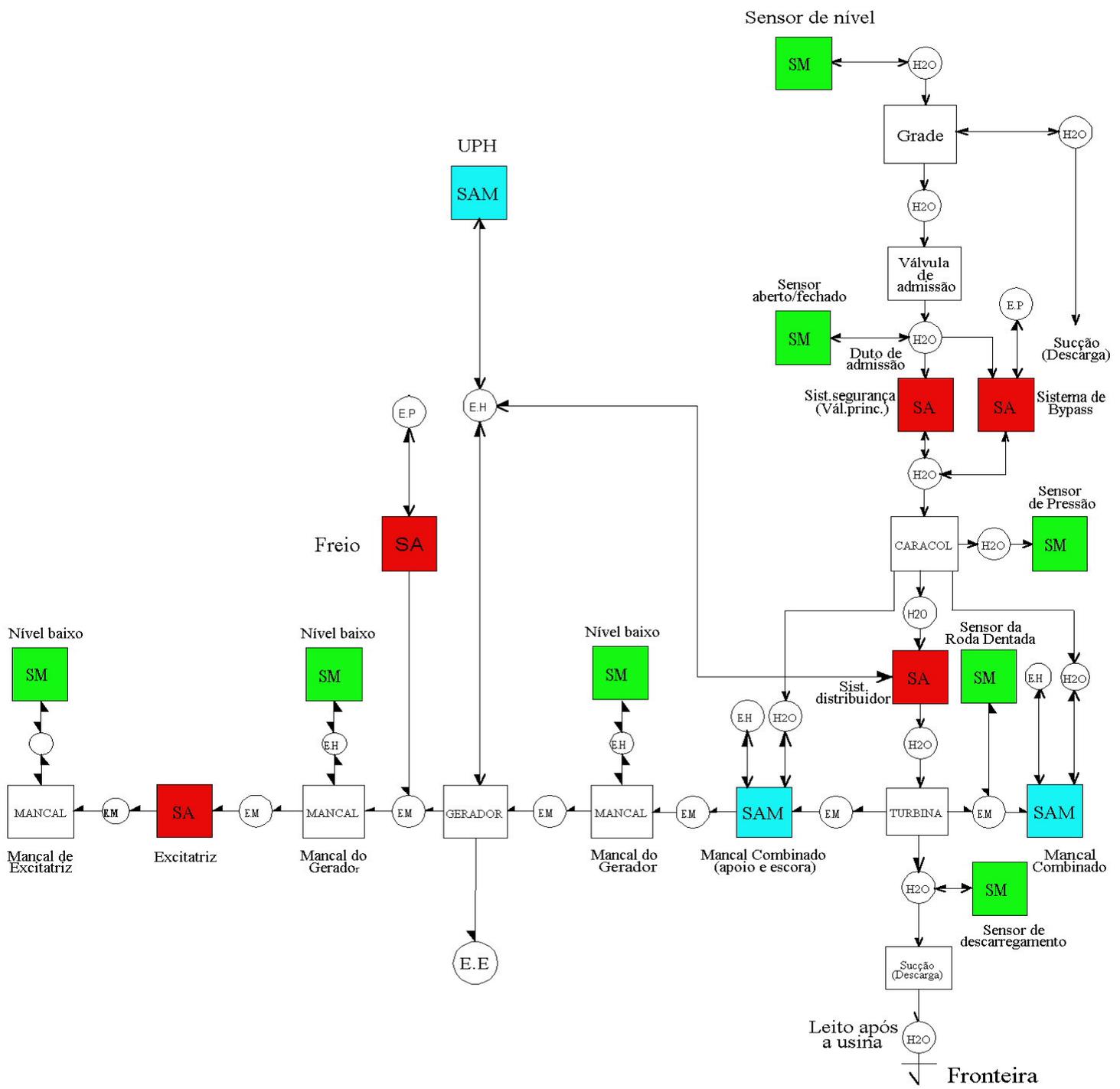
Cada uma das agências da rede geral é refinada em sub-redes, este procedimento pode ser repetido, teoricamente, de maneira indefinida, de acordo com o grau de detalhamento desejado. O propósito é refinar até o ponto onde o projetista possa decidir se ainda é conveniente continuar representando por Rede C/A, ou se já vale à pena utilizar um diagrama do domínio de conhecimento específico como, por exemplo, diagramas de circuito elétrico, circuito hidráulico ou de software. Existirá uma relação de compromisso e sensatez por parte do projetista, é ele deve estabelecer as fronteiras.

O modelo foi construído utilizando as fotografias já apresentadas, visitas à usina e principalmente a Especificação Técnica, cuja cópia parcial é mostrada na Figura 6.7. Na

Figura 6.8 a seguir, é mostrada a modelagem da Usina de Herval e identificados todos os SM, SA e SAM existentes.

A disposição das agências e canais escolhida para a modelagem visou estabelecer uma correspondência direta da estrutura física existente, desde a barragem no diagrama - denominada de Fronteira - até a saída da água à jusante. Desta forma, a leitura da Rede deve começar na parte superior direita onde há agência (SM) “sensor de nível”, que está localizado junto à grade. Em seguida, descendo, acompanhando os Canais que agora transportam água, passa-se por diversas agências. Ao alcançar a turbina, fazendo-a girar, é produzido torque no eixo e, a partir de então, os canais passam a transportar Energia Mecânica (EM) e a água sai através da descarga até alcançar o rio. A seguir, os dois lados da turbina são suportados por Mancais Combinados (mancal de escora + mancal de apoio). Seguindo para o lado esquerdo, tem-se o Gerador onde a EM é transformada em Energia Elétrica (EE) e conduzida até o barramento da subestação da usina (não mostrado). Passando o Gerador, a EM alcança a excitatriz, que está ligada eletricamente ao gerador.

Um fato relevante que demonstra a importância da modelagem e documentação realizada é o seguinte: a excitatriz, ver Figura 6.6, é uma máquina cuja função, entre outras, é manter a tensão nominal da máquina no valor definido pela operação. Durante a modernização da usina, a função elétrica da excitatriz foi substituída pelo Regulador de Tensão (RT) mais circuitos eletrônicos. No entanto, a máquina permaneceu no local original cumprindo agora uma função exclusivamente mecânica, para manter o balanceamento das forças no conjunto Turbina-Gerador. Entretanto, existiam sinais ligados à excitatriz que forneciam informações para outras partes do sistema. Então, um questionamento é natural: o que será feito com estas informações? Se o projetista dispuser apenas de representação esquemáticas (desenhos, fotografia etc.) terá mais dificuldade em dar uma resposta rápida e precisa a este respeito. Por outro lado, de posse de uma representação diagramática, no caso a rede C/A e seus refinamentos, saberá quais os subsistemas que estão ligados àquele equipamento e prever como e quem serão afetados. Por exemplo, seria o SM de temperatura nos enrolamentos da excitatriz. Poderá ainda, de posse dos diagramas da UML (que serão apresentados a partir da seção 6.4) saber em que parte do software que controla o funcionamento da usina, esta informação influenciará.

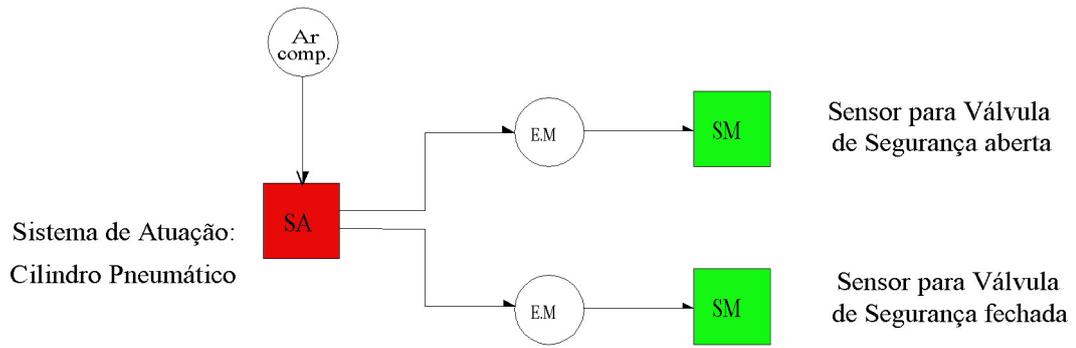


Rede C/A - Geral da PCH de Herval

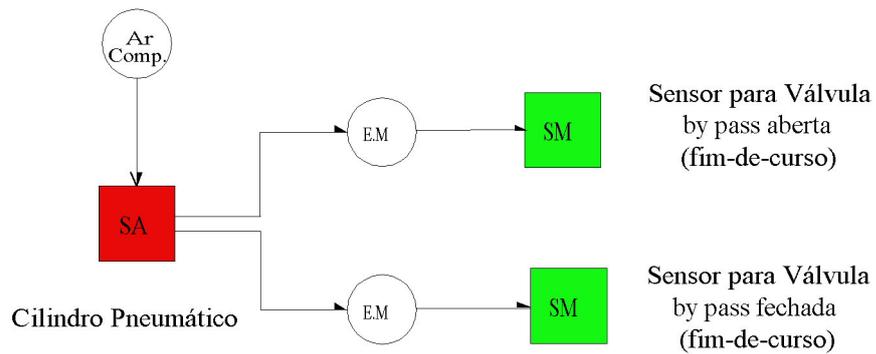
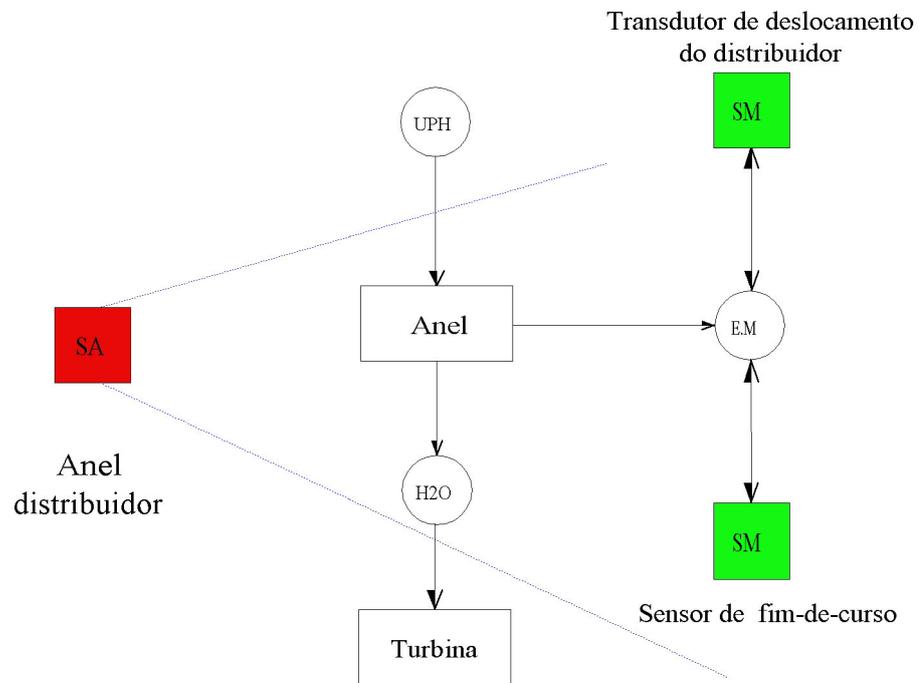
Figura 6.8 - Rede C/A geral da Usina de Herval

Nas Figuras 6.9 a 6.11 são mostrados os refinamentos de cada um dos SM's, SA's e SAM's identificados no rede geral. Foram construídas sub-redes até o segundo e terceiro níveis, a partir daí foram utilizados os diagramas de domínios específicos (hidráulicos, elétricos ou de software). Analisando-se Figura 6.9a identifica-se o SA Válvula de Segurança, e os SM que estão a ele ligado a este. Não se trata efetivamente de um sistema de medição, são apenas sensores. O refinamento dos demais SA's continuam na partes b e c da mesma figura. Em seguida, na Figura 6.10 b, os sistemas tornam-se mais complexos, aumentando a importância dos refinamentos. Em especial, os subsistemas ligados ao gerador, na Figura 6.10c, dá origem a um terceiro nível de diagrama. Na Figura 6.11 é mostrado o refinamento das agências SAM do Mancal combinado em outras Redes C/A. Entretanto, foi apresentado uma outra opção. O projetista tem a possibilidade de ao invés de construir um segundo nível da rede C/A, partir imediatamente para representar o mancal através de um circuito específico, no caso um circuito hidráulico (Figura 6.12). Como mencionado anteriormente, usar uma maneira ou outra para mostrar os detalhes de tal agência, fica a critério do projetista. Caso necessite comunicar-se com um profissional de outra área, seria mais conveniente utilizar a primeira representação, senão, sendo apenas para uso próprio ou para profissionais que farão a montagem dos equipamentos, o segundo esquema é mais apropriado. O importante é que o profissional terá opções, restando-lhe o bom senso de utilizá-las convenientemente.

Esta modelagem foi feita utilizando o software Visio®. E através dos recursos de ligações (*hiperlink*), passa-se para níveis de refinamentos sucessivos, facilmente clicando em cada uma das agências. Esta facilidade contribui na correção, modificação e atualização do projeto e apresenta uma visão mais abrangente ao executor. Por exemplo, ao clicar na agência SAM (Mancal Combinado) representada pela Figura 6.8 é mostrada sua estrutura interna, formada por: sensores, bomba, filtro e trocador de calor (Figura 6.11).

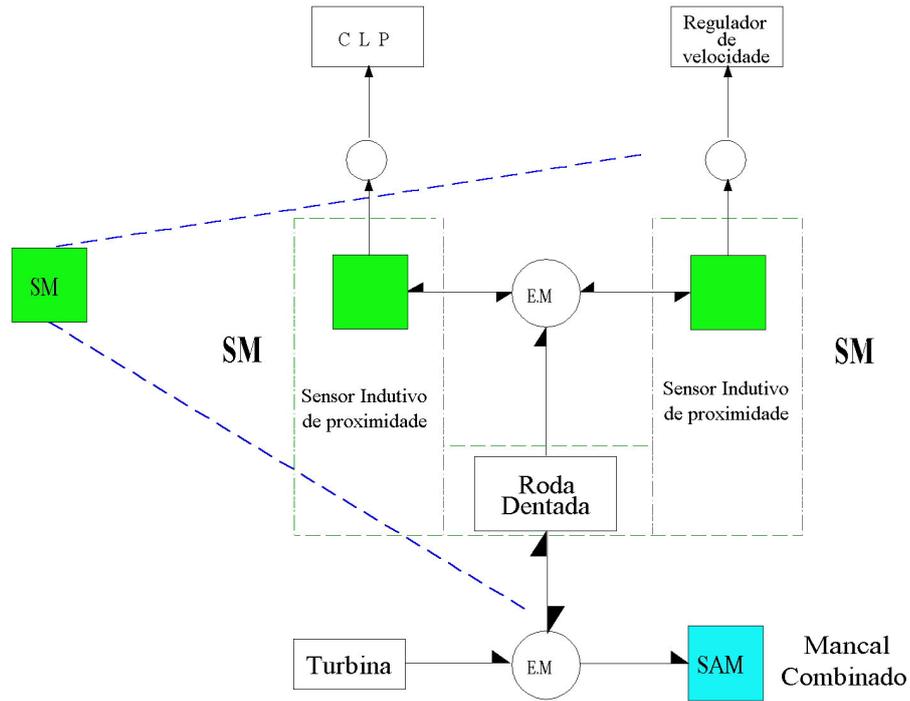


a) Sistema principal - válvula de segurança

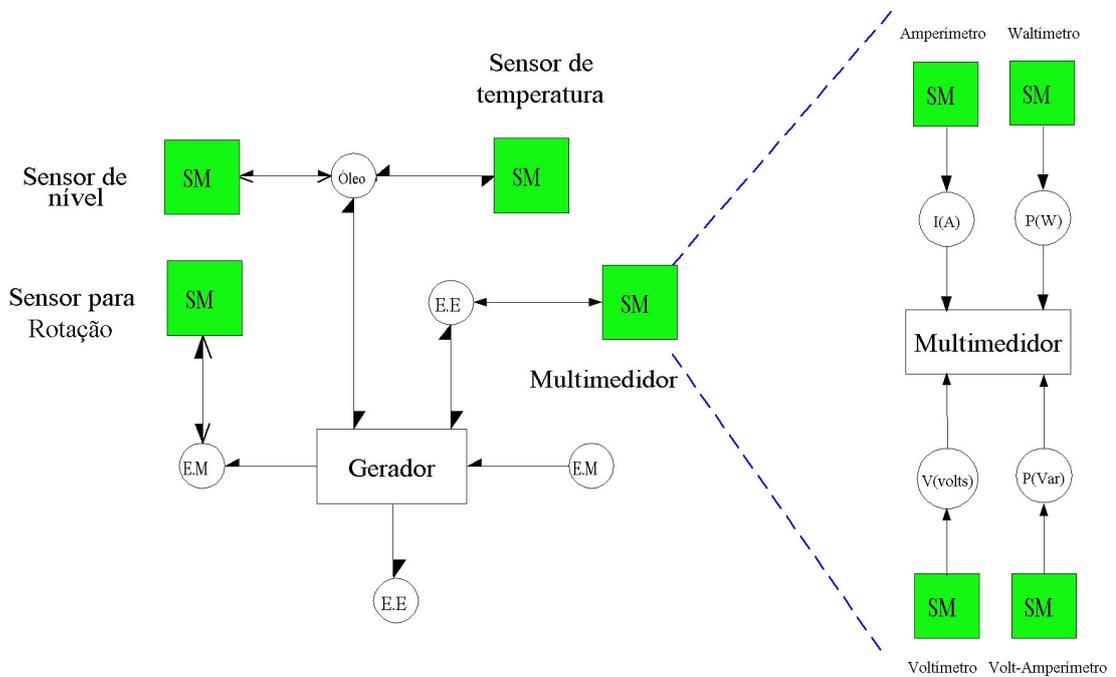
b) Sistema de válvula *Bypass*

c) Sistema distribuidor

Figura 6.9 - Refinamentos das agências: válvula principal e *bypass* e anel distribuidor.



a) Sistema Roda Dentada



b) Gerador

Figura 6.10 - Refinamento das agências: Roda dentada e Gerador.

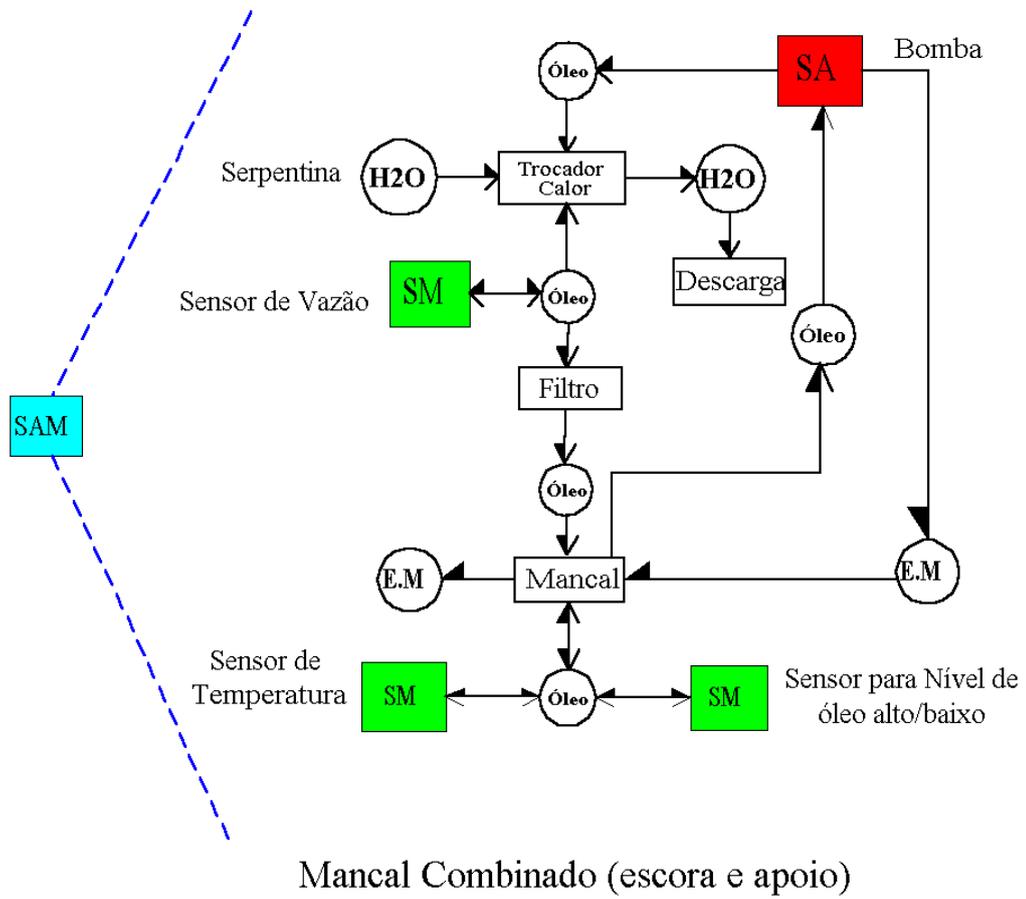


Figura 6.11 - Refinamento das agências dos mancais combinados.

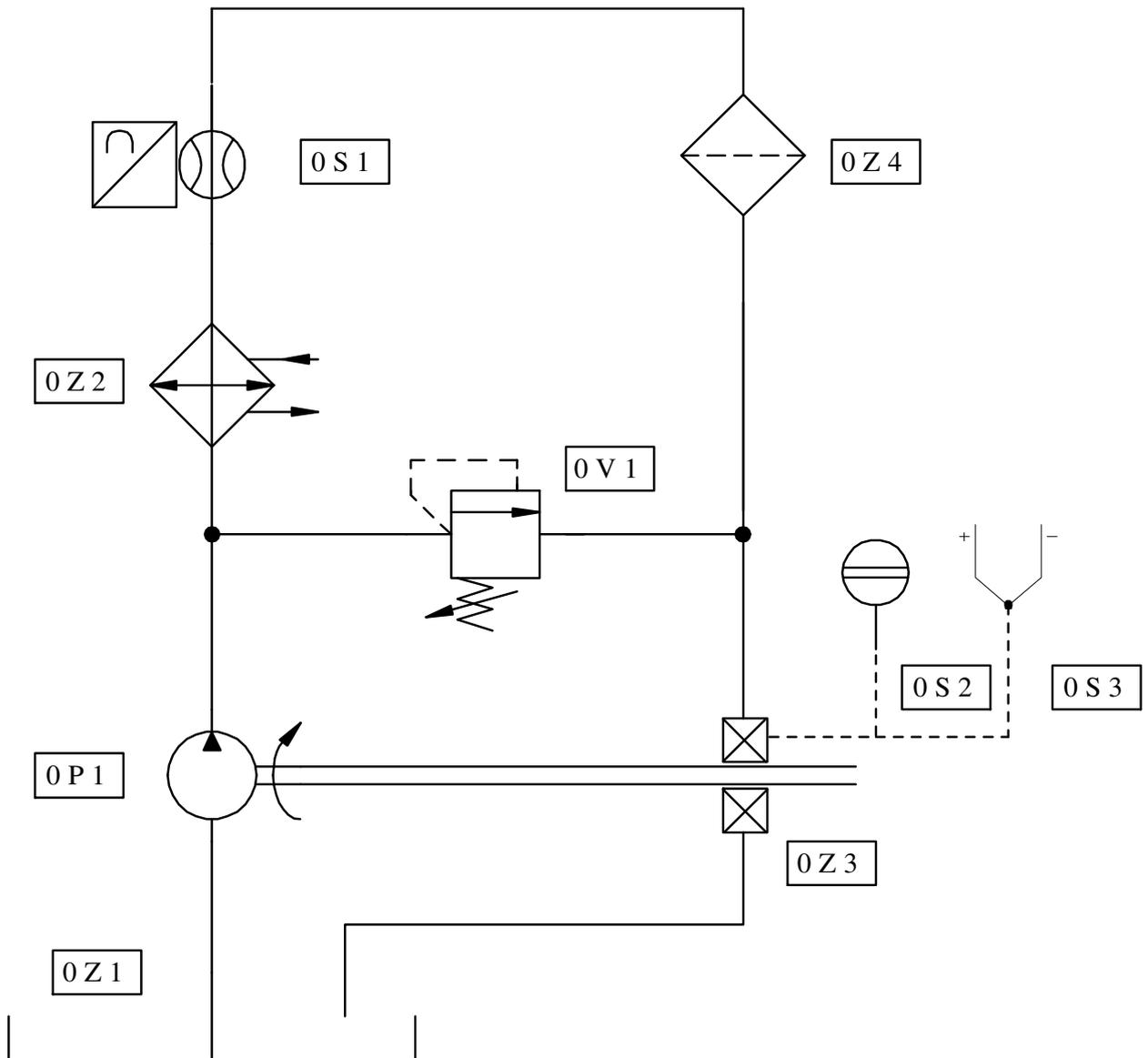


Figura 6.12 - Refinamento da agência mancal combinado, usando diagrama de circuito hidráulico.

6.3.4 - Modelagem do Fluxo de Informação

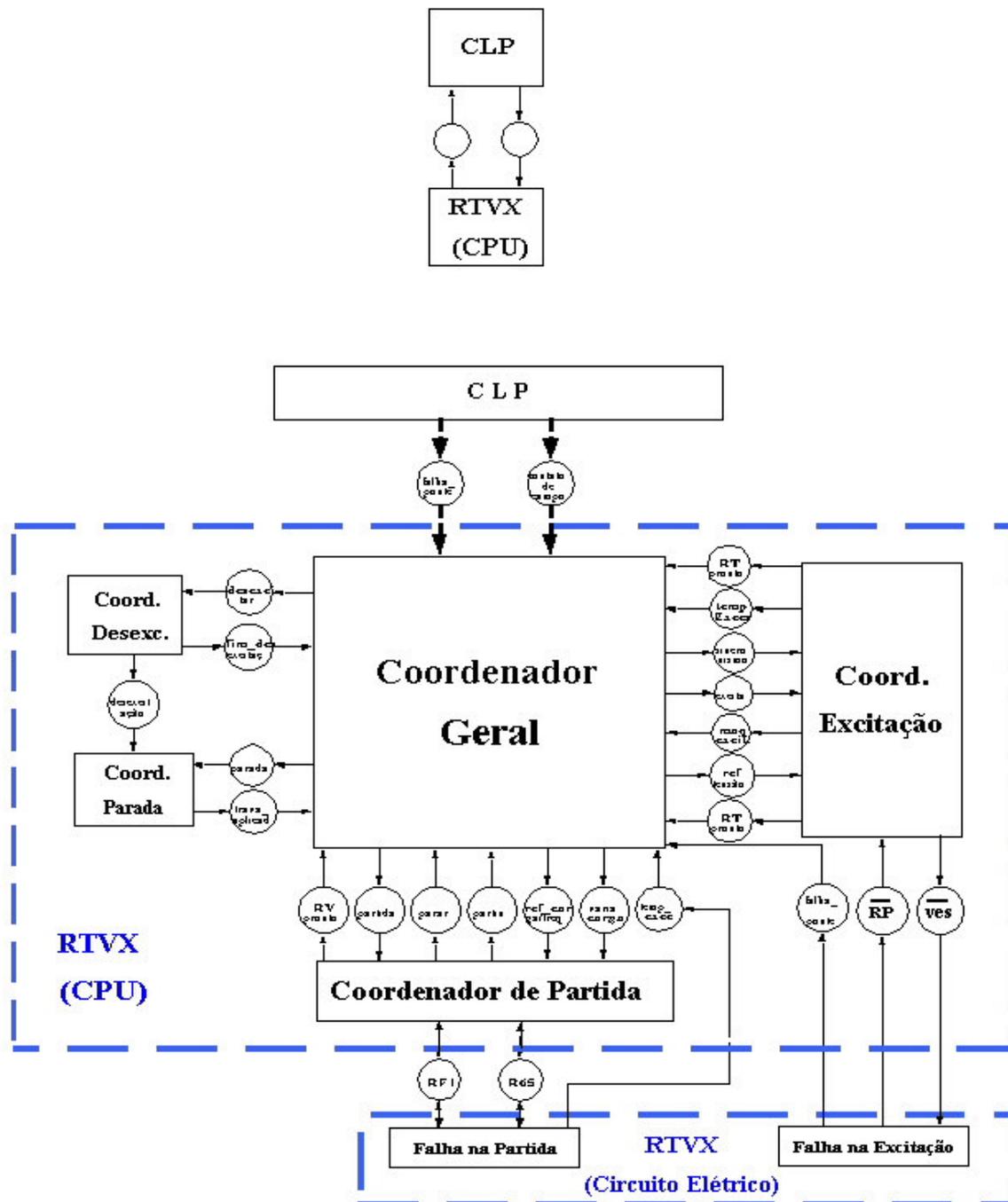
As informações utilizadas para construção do modelo de fluxo de informação foram as seguintes: visita à usina, entrevista com engenheiros e operadores, e bibliografia técnica. Entretanto, a principal fonte foi a documentação fornecidos pelas empresas, que estão em formato texto. Parte deste material é mostrada na Figura 6.13, no item 2 do documento que mostra as características de operação descrevendo o funcionamento da usina.

A CPU onde rodam os algoritmos de controle dos reguladores de velocidade e tensão, RTVX, tem como função interpretar todos os sinais recebidos e, com base nestes, executar a lógica de funcionamento, proteção e controle do sistema. Além disto, é encarregada da comunicação com o CLP (Controlador Lógico Programável) de controle do grupo e com a IHM (Interface Homem Máquina) local. O objetivo da modelagem é transformar as informações textuais e esquemáticas para uma diagramática, utilizando Grafcet.

Para modelar a parte da CPU referente às funções mencionadas, definiu-se alguns subsistemas que compõem o funcionamento da usina, desde a partida a vazio, até seu funcionamento em plena carga. A saber:

- » Coordenador Geral;
- » Coordenador de Partida;
- » Coordenador de Parada;
- » Coordenador de Excitação ;
- » Coordenador de Desexcitação.

A Figura 6.14 mostra hierarquicamente os Coordenador (agência) são realizados pelas trocas de mensagens entre eles.



Legenda:

- ref_carga/freq - aumenta e diminui referência de carga e frequência;
- ref_tensão - diminui e aumenta referência de tensão;
- variação_carga - habilita variação da carga;
- falha_ponte - falha na ponte de tiristores (temperatura alta ou fusíveis queimado);
- sincronismo - habilita sincronismo automático;
- temp_excessivo - tempo excessivo de excitação inicial;

Figura 6.14 - Rede C/A de Supervisão – Ligação entre os Coordenadores dentro da CPU (RTVX).

Foram construídos Grafcet's correspondentes a cada um desses subsistemas que estão interligados. O denominado Coordenador Geral –'coordGeral', como o próprio nome sugere, trata-se de um Grafcet que centraliza todas as atividades. Através deste, os outros são acionados (chamados), evoluem, concluem suas tarefas e retornam para o 'coordGeral', que dará prosseguimento às demais atividades do programa.

Neste diagrama modela-se a parte da CPU onde estão também o controle de velocidade e de tensão, no entanto não faz parte do escopo deste trabalho os algoritmos realizadores destas funções. Há vários instantes na evolução dos Grafcet's, onde estes recebem comandos/entradas de agentes externos, que chamaremos de **Atores**, por exemplo, o CLP. O Controlador Lógico realiza atividades de supervisão geral da usina, através de lógica externa. Por exemplo, verificar se o sensor que deteta sujeira na grande de admissão está acionado, se o disjuntor 52 está atuado, se a unidade hidráulica está sem falhas etc. Cada uma dessas interferências é documentada nos diagramas UML que serão mostrados na próxima seção. Portanto, os Grafcet's não mostraram como o CLP adquiriu as informações, saberá, no entanto, qual a origem e onde será usada.

A Figura 6.15 mostra o modelo comportamental do 'coordGeral'. O CLP de controle de grupo, depois de haver realizado lógica externa, envia um sinal que será uma das entradas para lógica "E" que, se positiva, disparará a transição, habilitando-o para realizar passo 2, efetuando sua primeira ação: "verifica Estado do Regulador de Velocidade (RV)".

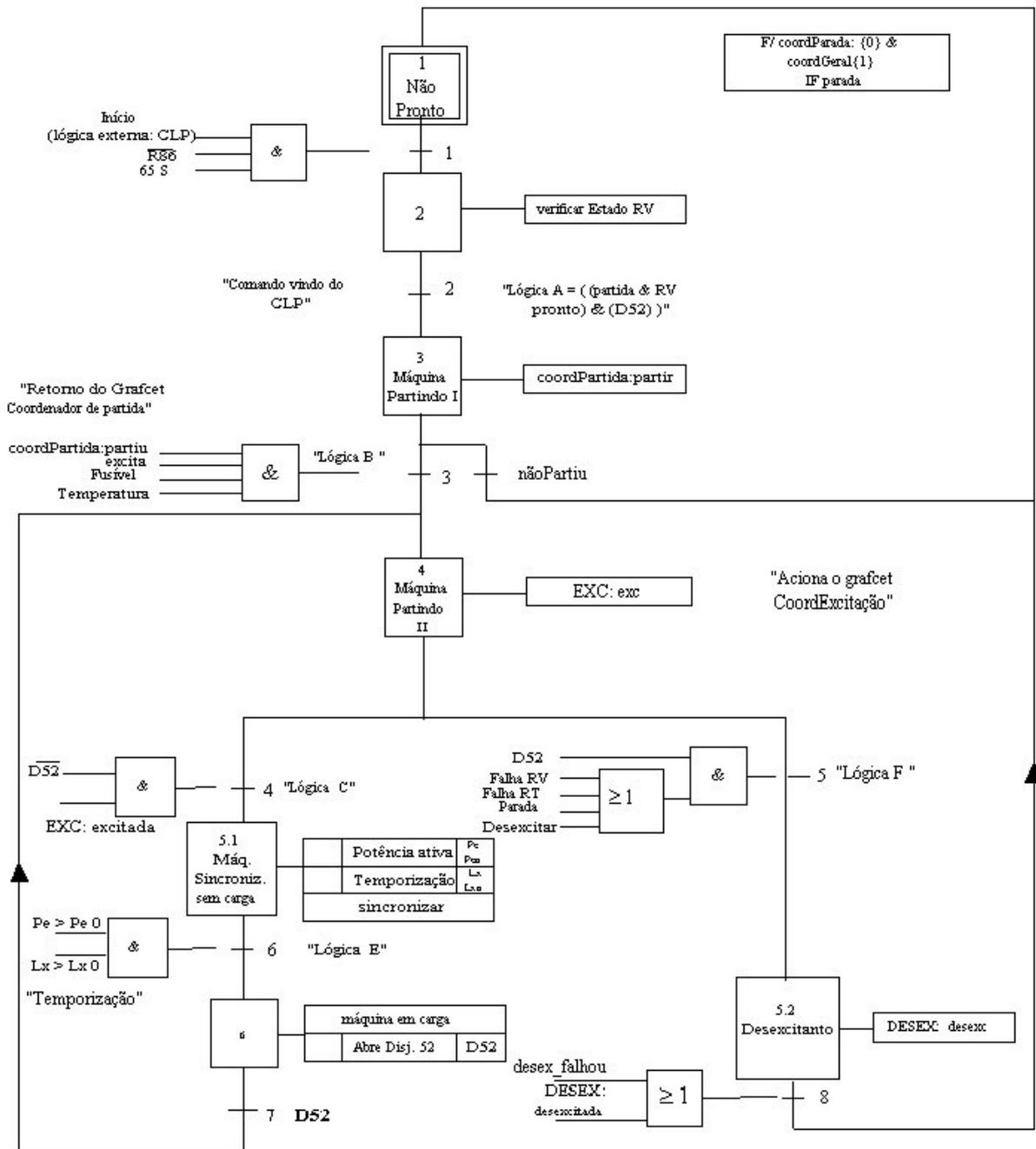
Para a chamada/acionamento de outro Grafcet, a partir do coordenador Geral, a ação do passo 3 (Máquina Partindo), 'coordPartida:partir', 'partir' é a transição, que ao ser disparada faz o 'coordPartida' (Figura 6.16), sair do passo '0' para o passo '1', ao concluí-lo haverá duas possibilidades: a do passo 'Falhando' terminando com a ação 'não partiu' que será a transição que faz o 'coordPartida' voltar para o passo inicial 'Não Pronto' ou se for para o passo 4.2, sua ação será 'partiu', também retornando para o 'coordPartida' que, será uma das transições que compõem uma lógica "E", cujo resultado fará o Grafcet evoluir para o próximo passo "Excitação". A notação correspondente ao 'retorno' ao Grafcet "chamador", neste caso é 'coordPartida:partiu' e CoordPartida:nãoPartiu.

Neste diagrama observa-se a utilização da ação tipo *stand alone*, "F/coordParada:{0} & coordGeral{1} IF parada". Este passo significa que a qualquer instante da evolução do Grafcet pode haver uma solicitação de parada, em condições normais ou em emergência. Nesta situação, a notação garante, na verdade força (F/), que a evolução será para o passo 0 do 'coordParada' e para o passo 1 do 'coordGeral'.

Cada ação significa um desdobramento de outras realizações que estão ligadas àquela ação. Por exemplo, ao energizar-se um contator, seus contatos fecham-se ou abrem-se, estabelecendo a ligação ou desligamento de outros equipamentos ou dispositivos.

As Figuras 6.17 a 6.19 documentam o Grafcet dos demais sub-coordenadores cujo intertravamento com o Coordenador Geral ocorre da mesma forma como descrito anteriormente

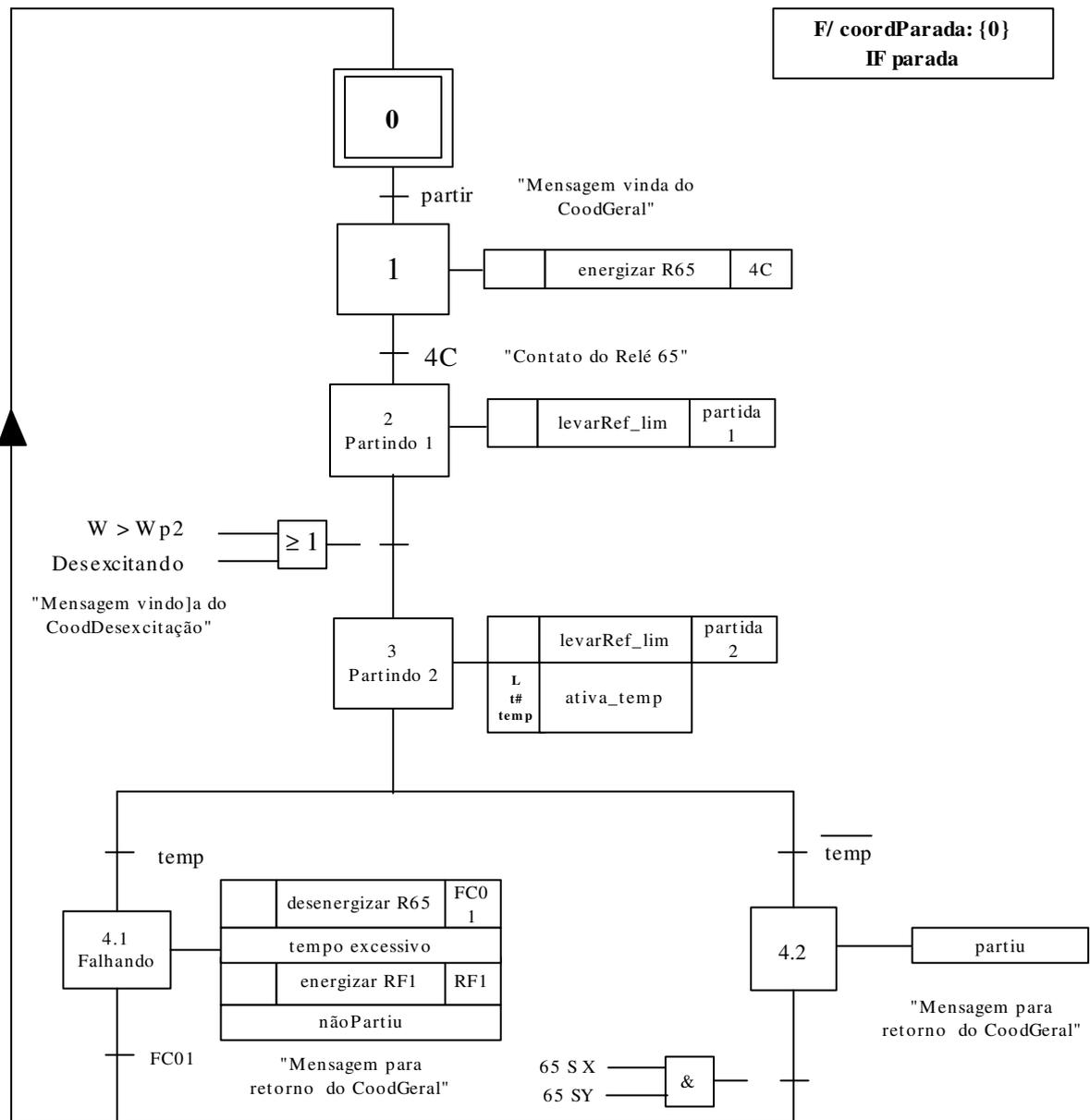
CoorGeral - CPU (RTVX)



- $\overline{R86}$: Relé 86 Desenergizado (não há comando de bloqueio por falha ou por comando externo)
- F : fusível íntegro
- Temperatura : em níveis aceitáveis
- Lógica externa, por exemplo:
 $\overline{RF1} \overline{RF2}$: Não há falhas graves : na unidade hidráulica
- 65 S - solenóide da válvula de partida/parada energizado
- D52 - disjuntor principal aberto
- Pe - Potência ativa
- Peo - Potência ativa nula
- Lx - Tempo de potência nula

Figura 6.15 - Grafcet Coordenador Geral

CoordPartida PRT



Notas:

temp - tempo limite para a turbina alcançar a velocidade desejada, qdo atingido implica em falha

w - velocidade da turbina

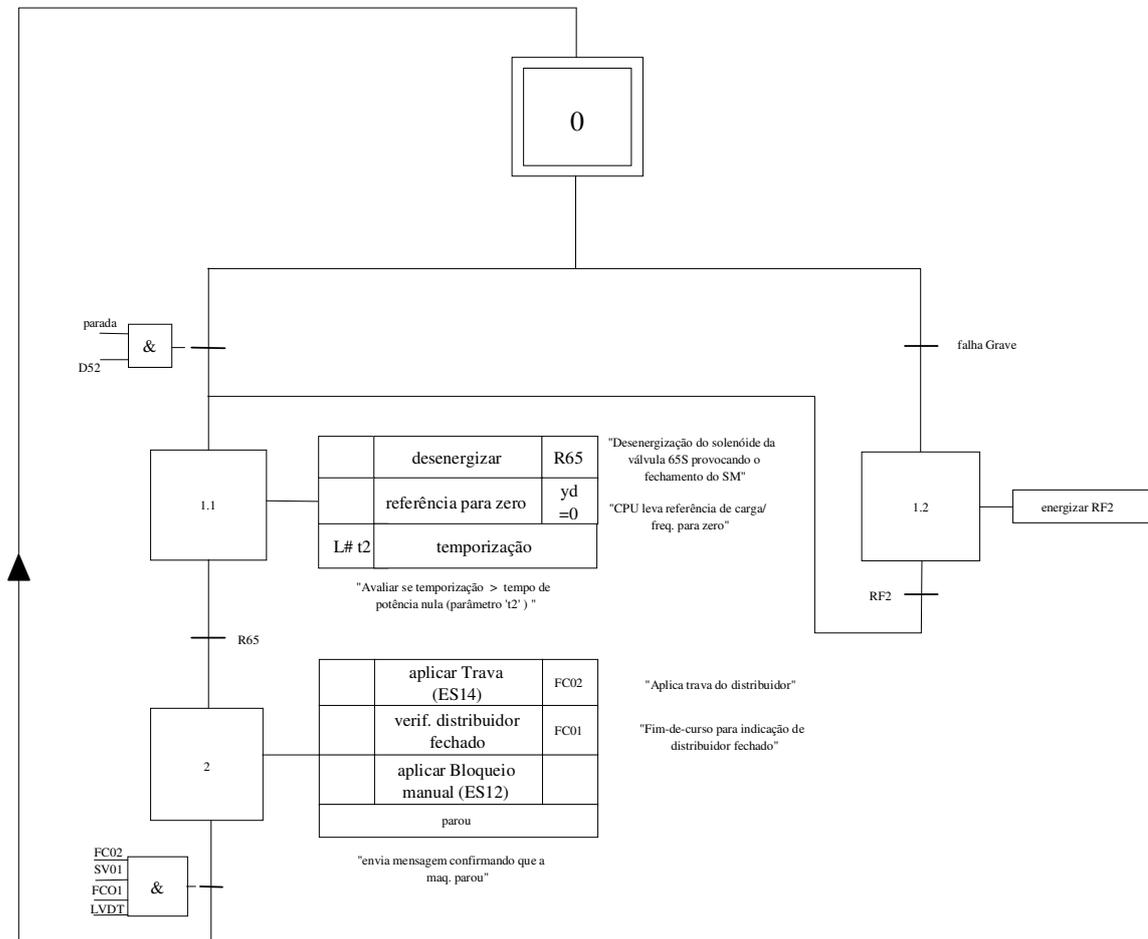
wp2 - velocidade da turbina estabelecida via IHM - (parâmetro)

FC01 - fim-de-curso para indicação de distribuidor fechado

65S (X,Y) - comando manual da válvula posicionada para operação normal

Figura 6.16 - Grafcet do Coordenador de Partida

CoordParada (PDA)

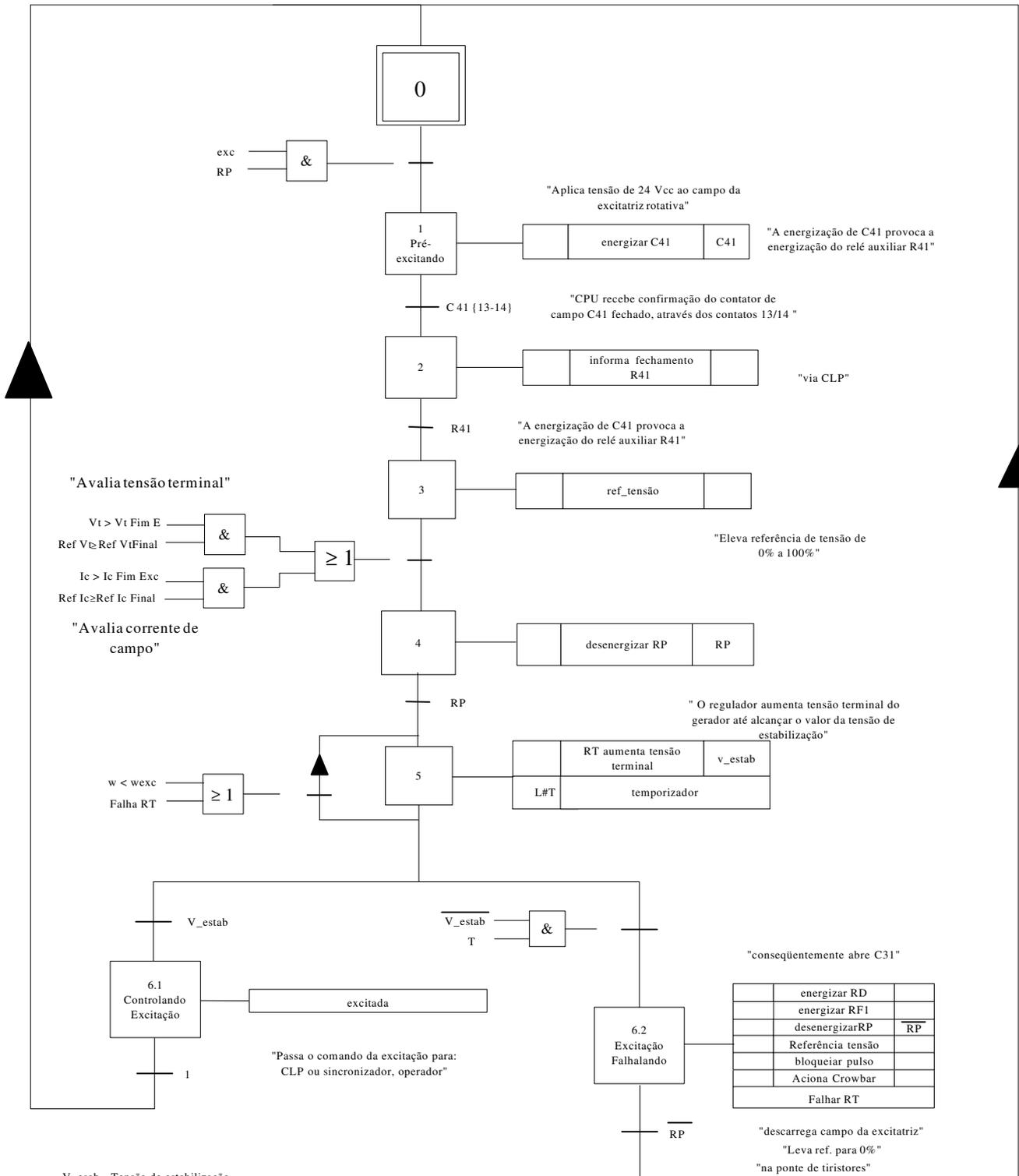


FC02, SV01, LVDT, FC01 - ver diagrama hidráulico - Apêndice B
SM - servo motor

D52 - Disjuntor de aberto
yd=0 leva referência de carga/freq. para zero

Figura 6.17 – Grafcet do Coordenador de Parada

CoordExcitação EXC



V_estab - Tensão de estabilização
 RP - energizado
 T - tempo limite para que seja atingida tensão de estabilização para que a ponte de tiristores seja comandada pelo RT
 - Ic - Corrente de campo
 - IcFimExc - Corrente de campo fim de excitação inicial

- vt - Tensão terminal
 - VtFimE - Tensão terminal fim Excitação inicial
 - Ref Vt - referência de tensão
 - Ref Ic - referência de corrente
 - R41 - Contato de campo fechado

Figura 6.18 - Grafset do Coordenador de Excitação

Desexcitação do Gerador DESEX

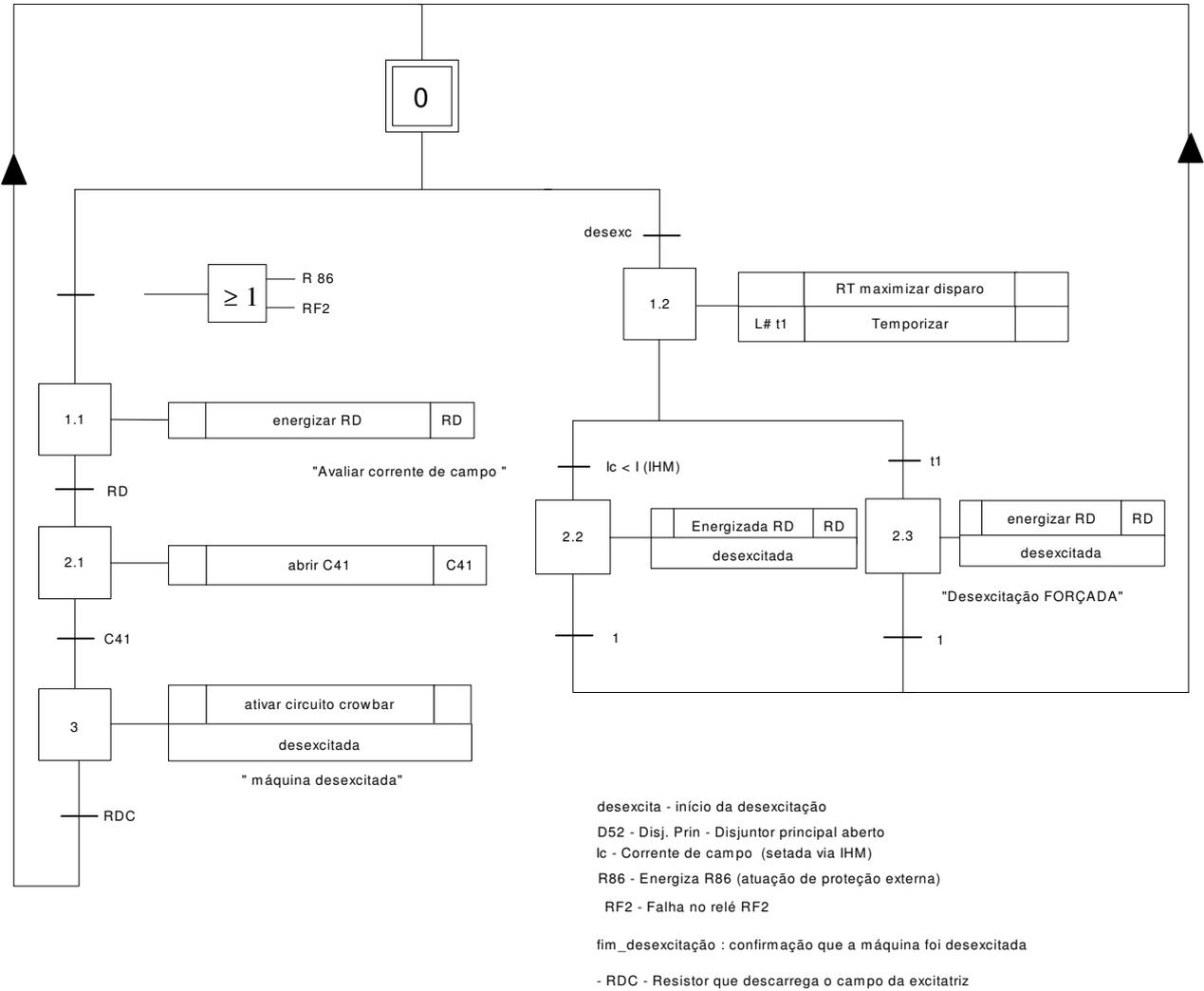


Figura 6.19 - Grafcet Coordenador de Desexcitação

6.4 MAPEAMENTO DOS SUBSISTEMAS DE COORDENAÇÃO EM SOFTWARE ORIENTADO A OBJETOS

Na seção anterior o Grafcet foi o meio utilizado para modelar o comportamento da usina através dos subsistemas definidos. Entretanto, não é o objetivo desta ferramenta documentar o que ocorre entre os sub-sistemas e suas interações, em nível de software. Para esta finalidade, empregam-se os diagramas da UML. Conforme demonstrado do capítulo 3, foram utilizados apenas três diagramas: Caso de Uso, Seqüência e de Classes.

Nas seções seguintes serão mostradas as aplicações dos diagramas com o propósito de mapear no software as informações dos Grafcet'. Para comprovar a aplicabilidade deste mapeamento foi desenvolvido e implementado o código fonte do software que comanda parte do Sistema de funcionamento da usina.

O Diagrama de Caso de Uso permite uma rápida e fácil interação com os envolvidos no projeto e até mesmo o cliente. Pois estabelece a fronteira entre os conhecimentos técnicos em geral e os requisitos frente à engenharia de software para a implementação do sistema. Tendo como base a Rede C/A apresentada na figura 6.14 os Coordenadores foram transformados diretamente em Casos de Uso, conforme mostra a Figura 6.20. Assim, o subsistema 'coordGeral' foi mapeado diretamente em um Caso de Uso, homônimo. E assim sucessivamente para os demais sub-sistemas: 'coordPartida', 'coordParada', 'coordExcitação' e 'coordDesexcitação'.

Foi utilizado <<estende>> que, segundo FURLAN (1998), trata-se de uma "Generalização estereotipada entre Casos de Uso especificando que o conteúdo do Caso de Uso estendido pode ser somando ao Caso de Uso fonte". Neste caso, o fonte é 'coordGeral'.

O esquema da Figura 6.21 mostra as interligações elétricas entre os módulos eletrônicos do regulador de tensão e velocidade (RTVX). Entretanto, existem interligações em nível de software que não são mostradas neste desenho. Na figura estão representados nos retângulos: circuitos integrados dos acopladores ópticos de entrada e saída (AE-1, AE-2 e AS-1) isoladores galvânicos e o amplificador operacional (AMP). Um maior nível do detalhamento é visto na Figura 6.22 onde o relé e seus contatos são identificados. Para o tratamento em nível de software, o papel desempenhado por estes elementos são mapeados por seus Atores homônimos.

Assim, Atores: CLP, acopladores ópticos (ACOP): AE-1, AE-2 e AS-1 , e os dispositivos (DISP): relés (R86, R65), Ponte de tiristores, contadores, sincronizador, disjuntor. Desta forma, a função dos diagramas de Caso de Uso é sair de uma documentação descritiva e diagramas elétricos, para uma diagramática visando a implementação do software. Portanto, a Figura 6.20 estabelece a fronteira e ao mesmo tempo a ligação da representação esquemática dos desenhos de circuitos elétricos com os diagramas de software.

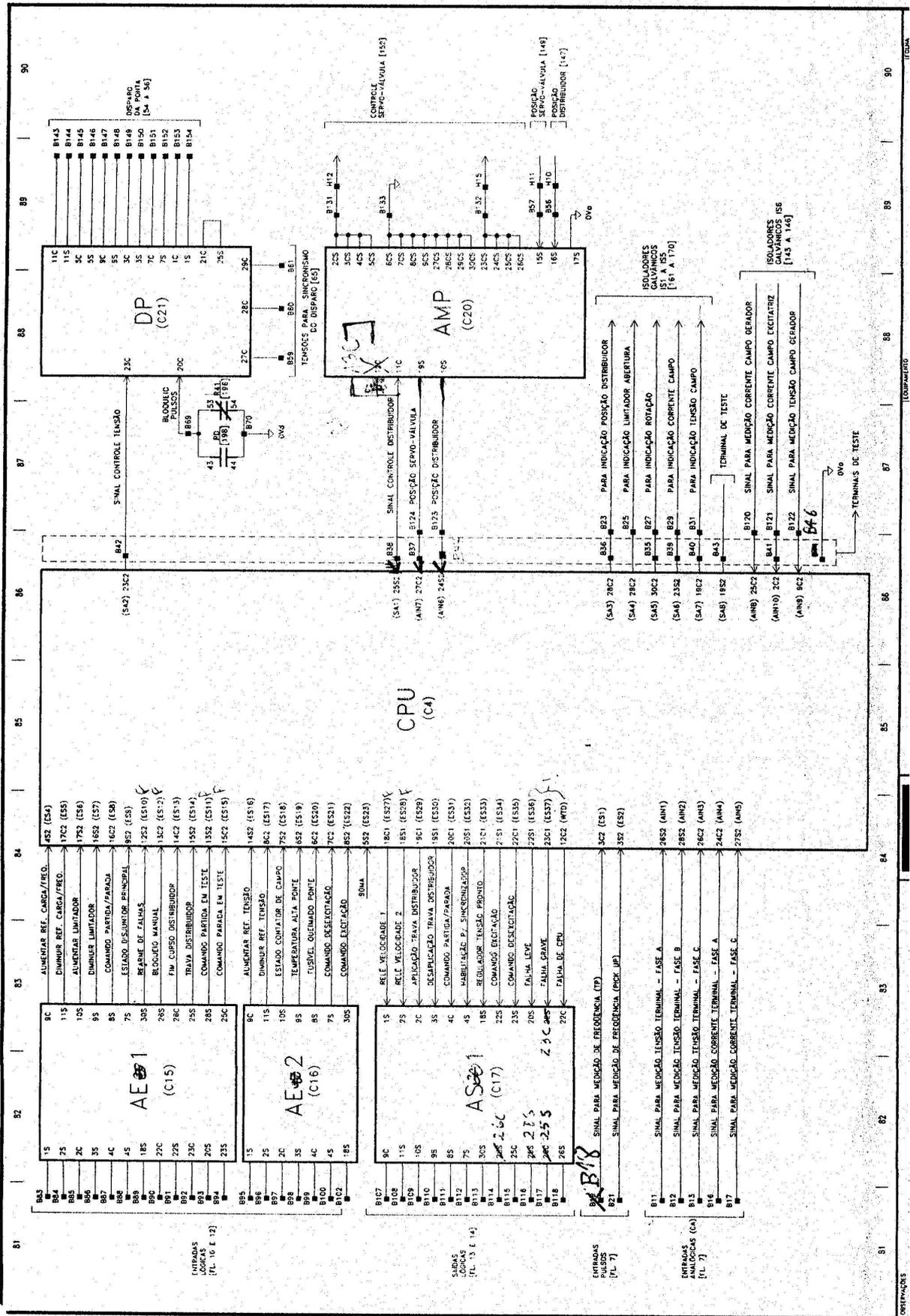


Figura 6.21 – Esquema Elétrico das Interligações entre Módulos Eletrônicos do Regulador (REIVAX, 2000)

Cada Caso de Uso do diagrama de Caso de Uso é mapeado em um diagrama de Seqüência, que é composto por todos os Objetos que fazem parte do Caso de Uso e os Atores que interagem com estes Objetos.

A seguir são apresentados os diagramas de Seqüência de cada um dos Casos de Uso, através dos quais fica evidenciada a presença de software e equipamentos físicos em uma mesma figura. Esta representação é compreensível para engenheiros e programadores.

Ao contrário da representação através do Grafcet, pode-se verificar detalhadamente o que acontece dentro de cada um dos subsistemas, mapeando todos os caminhos realizados para processar uma dada informação, desde o instante em que um sinal é gerado ou o remetente envia a mensagem. Também são identificados todos os Objetos e componentes físicos que a informação percorre até atingir o seu destinatário. O que este destinatário vai fazer, ou seja, como vai manipular esta informação chegada, poderá ser visto de duas maneiras. A primeira é, caso a mensagem seja encaminhada para o CLP, o software que ali roda saberá o que fazer com as informações e para onde as enviar. A confecção desta programação não está no escopo da dissertação. A segunda possibilidade é quando as mensagens alcançarem os Objetos que compõem o programa onde a manipulação destas informações é feita através de software orientado a objeto. Porém, antes é necessário construir o Diagrama de Classe e, a partir deste, o código fonte do programa.

A construção dos diagramas de Seqüência é uma realização direta dos Casos de Uso. São um mapeamento passo-a-passo dos Grafcet's, acrescentando o detalhamento completo de cada uma das ações realizadas nos passos correspondentes, pois cada uma das ações realizadas no Grafcet corresponde ao desencadeamento de uma série de outros desdobramentos, funções e operações em nível de software. As Figuras de 6.23 até 6.27 mostram os 5 diagramas correspondentes a cada um dos Casos de Uso. Os Atores compõem uma super-classe (ou classe mãe) DISP (Dispositivo), cujas filhas são todos os dispositivos do sistema e os atributos são suas respectivas propriedades que representarão seus estados.

Serão apresentados a seguir, alguns exempls destes mapeamentos para se ter uma idéia do funcionamento. No Grafcet 'CoordGeral', o primeiro passo, ou passo '0', é o de 'regulador não pronto' e não há ação; a seguir há três entradas para realização da lógica AND, uma vindo da IHM, uma do relé 86 e outra da válvula 65S, que será feita pelo CLP. As informações são passadas através dos Atores que representam os dois componentes (relé e válvula) e o CLP. O CLP após ter processado esta informação e obtido nível lógico '1' (verdadeiro) para o resultado da lógica 'E', envia uma 'mensagem', que na verdade é um sinal de tensão para Ator ModBus, que em uma visão simplificada tem a função de transformar o sinal elétrico em digital (bits) enviando para o 'objeto ImModBus', por sua vez transforma o

sinal digital em uma mensagem propriamente dita, a qual pode ser compreendida e manipulada pelos outros Objetos. Voltando ao Grafcet CoordGeral pode-se ver que todo o ocorrido no diagrama de Seqüência, corresponde ao disparo da transição 1. Só agora poderá evoluir para o passo 2 e conseqüentemente realizar a ação ‘verificar estado RV’. Mapeando no diagrama de Seqüência corresponde ao Objeto C_GERAL, que é uma instância da Classe coordGeral, enviar uma mensagem ao objeto RV, que por sua vez é instanciãção da Classe regulador de velocidade. Esta, então, realiza o algoritmo interno verificando realmente o estado do regulador e retorna o resultado para o C_GERAL, que o armazena numa variável própria. Voltando mais uma vez para o Grafcet, vê-se a segunda transição, a Lógica A, que corresponde ao: comando vindo do CLP, após ter feito várias checagens (não mapeadas aqui), estado do disjuntor D52 e o estado do regulador (resposta enviada pelo objeto RV para o C_GERAL).

Agora, ao contrário da transição 1, onde a avaliação é feita através do CLP, a avaliação da segunda transição é feita pelo objeto C_GERAL, em uma operação denominada de autodelegação, pois é chamada e realizada dentro daquele Objeto. Caso a avaliação seja positiva, o Grafcet dispara a transição e evolui para o passo 3 (Máquina Partindo) provocando a operação ‘coordPartida:partir’. Conforme foi dito na seção 3.2, significa acionar um outro Grafcet, no caso ‘coordPartida’, que mapeando suas ações no diagrama de Seqüência, corresponde ao envio de uma mensagem ‘partir’ para o objeto C_PRT, que é uma instanciãção da Classe CoordPartida. Da mesma maneira que acontece no Grafcet coordPartida, que evolui naturalmente até terminar seu processamento e retornar, o objeto C_PRT também processa e tem as mesma condições de retorno apresentados no Grafcet. Enviando a mensagem ‘partir’ ou ‘não partir’, sendo esta última condicionada a atuação do seu relé de falhas RF1. Nos diagramas de seqüência existe o recurso de representar lógicas condicionais, ou seja o SE (IF) em linguagem algorítmica ou linguagem de programação tal como C, Pascal etc. Este recurso deve ser empregado colocando a condição entre colchetes. Neste exemplo, a condição é o relé de falha RF1, deve ser escrito [RF1]. A colocação do símbolo ‘!’ na frente da sentença, significa sua negação.

A evolução do diagrama de Seqüência CoordGeral vai se desenvolvendo de forma similar à apresentada até aqui. De maneira sintética processo é o seguinte: o CLP faz verificação nos diversos dispositivos, envia seus estados/condições para o objeto C_GERAL, este, por sua vez, troca mensagens entre outros objetos para realizar suas avaliações, comparações e lógicas que representam as transições.

Os diagramas de seqüência também permitem fazer observações ou notas ao longo do desenho. Isto é feito no lado direito, depois do último objeto. Este recurso é importante

porque pode esclarecer possíveis ambigüidades, principalmente quando existem rotas alternativas de mensagens, como foi o caso quando se empregou a condicional SE. Também se pode escrever um mini algoritmo para que não haja dúvidas quanto ao encaminhamento das mensagens.

Nos diagramas de seqüência deste trabalho houver um ganho adicional, pois foram agregadas mais informações aos diagramas convencionais da UML, no que se refere ao relacionamento entre os Atores. Trata-se da utilização dos símbolos chaves { } onde, dentro destas, foram colocados um código alfa numérico que representa: o terminal do Circuito Integrado, o número na régua de borne, o contato do Contator e a bobina do solenóide entre outros. A utilização deste artifício mostra o nível de detalhamento que se pode alcançar, mesmo partindo-se de descrições de alto nível, como foi o a descrição funcional e estrutural feita com rede C/A.

As últimas mensagens recebidas por C_GERAL vêm do objeto C_DESEXC, instância da Classe coordDesexcita, informando se a máquina será desexcitada ou se a desexcitação falhou.

Este mesmo procedimento e análises ocorrem em todos os diagramas de Seqüências implementados.

O Diagrama de Classes é a representação estática do sistema modelado e representa a hierarquia existente entre os subsistemas. Mostra com quem o software e os equipamentos se relacionam diretamente.

O diagrama é construído após todos os diagramas de seqüência terem sido estabelecidos, mantendo a estrutura estabelecida pelo diagrama de Caso de Uso. As operações (métodos) que compõem as Classes correspondem a cada uma das mensagens enviadas para aquela Classe em todos os diagramas de seqüência. Por exemplo, no diagrama Coordenador Geral, são enviadas mensagens para o objeto C_GERAL, portanto as mensagens que chegam: início, partida, excita etc., na formação da Classe Coord_Geral, serão as operações homônimas, no caso início(), partida(), excita() etc., que formam o segundo compartimento da classe. O primeiro compartimento é formado pelos atributos, ou seja, são as propriedades cuja atribuição de valores define um estado. Como é o caso, por exemplo, do estado do disjuntor D52 ou “estado52”, onde é atribuído um valor “verdadeiro” informando que o mesmo está energizado. Como explicado na seção 3.3, cada atributo tem sua visibilidade estabelecida, no caso das estas classes todos são do tipo privado (*private*), ficando apenas as operações como públicas. Esta política de acesso é recomendada, pois os atributos são acessados através de operações (métodos) da mesma Classe e por operações de suas subclasses, evitando-se assim a manipulação e conseqüente alteração dos atributos por entidades não autorizadas. O diagrama de classe é mostrado na Figura 6.28.

6.4 Implementação do Código

Para comprovar a viabilidade da sistematização proposta no trabalho, foi desenvolvido e implementado o código fonte do programa que comanda parte do funcionamento da usina. Desta forma pode-se ter o entendimento completo do encaminhamento do projeto. A construção completa do sistema não é o objetivo central desta dissertação.

Portanto, de posse dos diagramas de Seqüência e Classes foi construído o programa que implementa o diagrama de seqüência do Coordenador Geral (CoordGeral).

O programa foi feito para ser executado em sistema operacional DOS, utilizando o ambiente C++ da Microsoft®. Alguns artifícios foram necessários para viabilizar o construção do software. Inicialmente, para cumprir a função dos dispositivos (sensor, disjuntor, fusível etc.) e equipamentos (CLP, Reguladores de Velocidade e de Tensão etc.) que estão permanentemente operando (Atores), foi construída uma interface com o usuário, onde este pode selecionar uma opção que represente o envio do estado de determinado sensor e também para determinar a resposta de outros objetos como, por exemplo, o RV enviou estado de ‘Pronto’ e assim sucessivamente. Estes artifícios também foram usados para demonstrar o estado dos dispositivos, por exemplo, o disjuntor D52. Assim foi atribuído um valor lógico a cada uma, que seria o atributo ‘true’ da Classe Driver, neste exemplo, o que corresponde a informar que o disjuntor está fechado.

O CLP, executa um processamento tal como verificar se determinado sensor foi acionado, processar esta informação e a enviar para o software que comanda o funcionamento da usina. No caso, envia para o CoordGeral. Isto também acontece com o Regulador de Velocidade (RV), que depois de receber entradas de posição e velocidade, processa o seu algoritmo e envia um sinal de saída para o CoordGeral. No caso do RV, foi modelado como uma classe chamada ‘ReguladorVelocidade’ e sua instância, o Objeto RV. Da mesma forma, foi atribuído um valor lógico, que pode ser modificado, especificando se o regulador está pronto ou não. Para uma utilização industrial real, o algoritmo do regulador que a Reivax (RTVX) desenvolve deveria incluir este Objeto RV, que ao ser processado enviaria uma saída com sua condição para o C_GERAL. E assim sucessivamente para os demais dispositivos existentes e os que serão desenvolvidos no futuro.

A tela interface com o usuário pode ser vista na Figura 6.29, mapeado diretamente do diagrama de seqüência Coordenador Geral, na Figura 6.26. O usuário comanda todo o funcionamento do sistema através da tela da seguinte forma: digitando a letra “i” ou “I” para

iniciar “o procedimento de partida” isto equivale ao CLP - após ter realizado verificações dos estados do relé R86 e da válvula 65S - enviar um comando “início”. Quando o Objeto C_Geral recebe este comando, processa e verifica o estado do Regulador, cuja resposta foi “Regulador ponto”. Em seguida, este Objeto fica aguardando outro comando do CLP, que o usuário deve digitar “2” para representar o envio. O sistema informa na tela que recebeu o comando e que avaliou a “lógica A” (RV & Partida1), que foi a operação seguinte, à chegada do comando. Caso avaliação da lógica seja positiva, o Objeto C_GERAL envia mensagem “partir ()”, fato que é informado ao usuário. A seguir, o usuário, fazendo às vezes de um relé detetor de falhas, informará se o relé RF1 está energizado ou não, caso digite “1” significa que não houve falha, conseqüentemente a máquina partiu; fato que também é informado na tela. Os procedimentos seguintes são similares ao mostrado acima. Em geral, sempre o CLP verifica o estado dos dispositivos, sendo o usuário o responsável por fazer as vezes destes dispositivos, informando os resultados ao sistema. Em seguida o Objeto C_GERAL, manipula-os convenientemente, trocando mensagens com os outros Objetos, com a finalidade de coordenar todas as ações necessárias ao funcionamento da usina. O apresentado na figura abaixo é uma parte do procedimento de funcionamento, o restante será visto utilizando a barra de rolagem da tela em ambiente DOS.

Nas Figuras 6.30 e 6.31 é apresentado parte do código fonte, construído em linguagem C++, que implementa o Coordenador Geral. O código completo pode ser baixado via internet em (PAES, 2001).

```

c:\ E:\prototipo.exe
Digite 'I' para iniciar procedimento de partida
i
Sinal para o começo do procedimento de partida recebido, iniciando...
Regulador pronto...
Digite <2> para iniciar efetivamente a partida
2
Recebeu sinal do CLP para partida
Avaliou logica A
Enviou mensagem partir
Se o rele RF1 esta energizado digite 0
Se o rele RF1 nao esta energizado digite 1
1
Partiu...
Digite <3> para CLP enviar comando de excitacao
3
Recebeu comando para excitacao
Digite <4> para o Fusivel enviar seu estado
4
Recebeu sinal do Fusivel
0 Fusivel informou seu estado
Digite <5> para o Termostato enviar seu estado
5
Recebeu sinal do Termostato
0 Termostato informou seu estado
Avaliou logica B - pronto para enviar o comando de excitacao
Enviou mensagem exc(), para iniciar a excitacao efetivamente

Digite <6> para disjuntor enviar seu estado
6
Recebeu sinal de D52
Disjuntor D52 informou estado
Avaliou Logica C - Negativo
Enviou sinal para habilitar sincronizador
Habilitando...
Digite <7> para o CLP enviar o estado do Sincronizador
7
Recebeu estado do sincronizador
Sincronizador informou estado:sincronizado...
Avaliou Potencias: Pe > Pe0
Avaliou Temporizador: Lx > Lx0
Avaliou Logica D - (Pe > Pe0 & Lx > Lx0) positivo

Maquina em Carga...
Avaliou Logica E: POSITIVO
Enviou mensagem desexc(), para iniciar a desexcitacao

Desexcitando...
Se houve desexcitacao digite 1
Se nao houve desexcitacao digite 0
-

```

Figura 6.29 – Interface que simula as entradas para o sistema que comanda o funcionamento da usina.

```

// Programa que implementa o coordenador geral.
// Autor: Fred Henrique Souza Paes // Laship - UFSC - Agosto 2001

//Definição dos valores na prática seriam pré-setados, via IHM (Interface
Homem Máquina)ou diretamente em parâmetros do software do regulador

#define Pe 2 //potenciaAtiva
#define Pe0 1 //potenciaAtivaNula
#define Lx 2 //Temporização
#define Lx0 1 //Temporização Potência Nula
#define RT 1
#define PARADA 1

#include "acopladorSai.h"
#include "regulador.h"
#include "excitada.h"
#include "partida.h"
#include "geral.h"
#include "Driver.h"

//Partes da implementação de alguns métodos da classe coordenador geral
coordGeral::informaEstado(int *status){
    int estado=*status;
    switch(estado){
        case 4:
            printf("O Fusivel informou seu estado\n");
            statusFusivel=true;

            break;
        case 5:
            printf("O Termostato informou seu estado\n");
            statusTermostato=true;
            avaliarLogica('B');
        case 6:
            printf("Disjuntor D52 informou estado\n");
            statusD52=true;
            avaliarLogica('C');

            break;
        case 7:
            printf("Sincronizador informou estado:sincronizado...\n");
            statusSincronizador=true; //O sincronizador está habilitado.
            potenciaAtiva();temporizacao();}}

coordGeral::avaliarLogica(char tipoLogica){
    statusExcitacao=true;
    switch(tipoLogica){
        case 'A':
            if(IHM && statusRV)
                printf("Avaliou logica A\n");
            if (situacaoPartida==(C_PRT.partir())){
                printf("Partiu...\n");
            }
            else
            { printf("Nao Partiu\n");
                // exit(0); //???Se a máquina não partiu, não há
                // necessidade de continuar o programa
                // goto teste;
            }
            break;

        case 'B':
            if(EXCITA&&statusFusivel&&statusTermostato)

```

```

        printf(" Avaliou logica B-pronto p/a enviar comando de excitacao\n");
        statusExcitacao=C_EXC.exc();
case 'C':
    if((!statusD52)&&statusExcitacao){
        printf("Avaliou Logica C - positivo\n");
    }
    else
    { printf("Avaliou Logica C - Negativo\n");}
    DriverAS.habilitaSincronizador();
    break;
case 'D': ...
case 'E':
    if ((statusD52) && (((statusRV) || (RT)) || (PARADA))){
        printf("Avaliou Logica E: POSITIVO\n");
        statusDesexcitacao=C_DESEX.desexc();}}

coordGeral::temporizacao(){
    if(Lx > Lx0){ //Estes valores estão como "#define's"
        statusTemporizador=true;
        printf("Avaliou Temporizador: Lx > Lx0\n");}
    avaliarLogica('D');}

```

Figura 6.30 – Parte do código fonte (.cpp) da implementação do coordGeral.

```

//-----
//     Parte do código que define a classe do coordenador geral           //
//-----

//Geral.h

class coordGeral{

private:
    bool statusRV, IHM, EXCITA, statusRF1, statusFusivel, ...;
    bool situacaoPartida, statusExcitacao, statusSincronizador, ...;

    reguladorVelocidade RV;
    coordPartida C_PRT;
    coordExcitacao C_EXC;
    coordDesexcitacao C_DESEX;
    driverAcopladorSai DriverAS;

public:
    inicio();
    informaEstado(int *status);
    partida();
    avaliarLogica(char a);
    excita();
    temporizacao();
    potenciaAtiva();
};

```

Figura 6.31 – Parte do código fonte (.h) da implementação do coordGeral.

Há alguns aspectos particulares nesta implementação conforme segue. Poderia ter sido realizada utilizando os recursos disponíveis na ferramenta CASE Visio, pois a versão *Interprise 2000* permite a geração automática do “esqueleto” do código. Isto significa que, após ser feita a parte de análise e desenho do sistema, facilmente pode-se gerar o código fonte em C++. Chama-se esqueleto, toda a estrutura, definições e construções das Classes e suas correlações. O programador escreverá a parte específica do código, ou seja as operações (métodos) que se realizarão. Este procedimento é similar às linguagens visuais como Delphi, Builder, Visual etc., onde arrasta-se um ícone ao mesmo tempo que a própria ferramenta gera o código correspondente a um botão de ratio, por exemplo.

No presente trabalho não foi explorada esta potencialidade do Visio pois a ferramenta geraria o código do software completo. Como objetivo era fazer apenas uma parte, o programa não rodaria. Outro motivo para não gerar o código automaticamente vem de uma motivação pessoal em aprofundar o conhecimento na programação orientada a objetos.

A vantagem em utilizar o Visio é poder começar a modelagem do sistema mecatrônico desde seu princípio, com as Redes C/A, depois construir os Grafcet's para a modelagem comportamental, em seguida modelar o software em UML e gerar o código, podendo realizar as validações e verificações no ambiente Visual C++, pois ambos são da empresa Microsoft, propiciando total compatibilidade. O grande inconveniente e perigo deste procedimento é valer-se de uma ferramenta proprietária e bastante cara. Corre-se o risco de tornar-se refém do Sistema Operacional. Neste sentido, existe uma equipe de pesquisadores na Espanha, desenvolvendo ferramentas abertas que realizam todas estas tarefas, inclusive permitindo a simulação da parte de controle do sistema. Pode-se comprovar isto, pelos trabalhos do grupo de pesquisa de XOÁN e RAMÓN (2000) que acompanham a tendência mundial em busca do software livre, normalmente baseados no Sistema Operacional aberto, no caso o Linux.

A modelagem do software foi realizada na ferramenta CASE Rose, da Rational®. Esta ferramenta é mais poderosa que o Visio, pois se trata de um software exclusivo para modelagem de software. Possui muito mais recursos que aquele, inclusive podendo gerar código em linguagens como JAVA, Smaltalk e C++.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÃO

7.0 – VISÃO GERAL DO TRABALHO

Este trabalho sistematizou o processo de automação de Sistemas Mecatrônico. Tal procedimento deu-se através do emprego de métodos científicos e ferramentas comerciais de software e teve como premissa documentar as atividades e as principais decisões adotadas pelos projetistas durante a Fase Conceitual do projeto. Permite a comunicação fácil e clara entre todos os profissionais envolvidos, mostrando-lhes as partes do sistema que serão, eventualmente, afetadas ao atender alguns requisitos do projeto.

Implicitamente ao objetivo central da dissertação, está a intenção de tornar as atividades de projeto no meio industrial sistemáticas e adequadamente documentadas sem, entretanto, inibir o poder criador dos profissionais ou negligenciar suas experiências prática. Desta forma, respondeu-se às necessidades da indústria através de mecanismos desenvolvidos na academia.

Foram pesquisados métodos agradáveis e convidativos aos projetistas e ao mesmo tempo formais e poderosos, de forma a garantir a precisão dos resultados. Assim, pôde-se explorar ao máximo o potencial dos métodos através de ferramentas que lhe dão suporte, bem como a criatividade do projetista.

Com o intuito de comprovar a aplicabilidade dos métodos e utilizando ferramentas de software apropriadas, foi realizada a sistematização da automatização de uma PCH, trabalho onde os conceitos mecatrônicos foram devidamente explorados.

Embora a ênfase do trabalho esteja na fase de projeto conceitual, o estudo de caso utilizado contemplou as fases seguintes, até o projeto detalhado onde foi codificado o programa.

7.1 – RESULTADOS ALCANÇADOS

Os objetivos do trabalho foram estabelecidos na seção 1.6, os resultados obtidos foram os seguintes:

- Ao se construir código fonte de parte do sistema que comanda o funcionamento da usina, provou-se que é possível ao profissional, a partir de uma documentação estrutural, fotográfico ou mesmo descritiva, formulada no início do projeto, inclusive no momento de levantamento de campo, prever implicações, em nível de software, de decisões assumidas naquele instante.
- Impede que o engenheiro de software ou mesmo o programador, que está na outra ponta do desenvolvimento do sistema, tome decisões de implementação que poderiam ser inviáveis ou até impossíveis de serem realizadas em nível de componentes físicos.
- A documentação permite aos projetistas interações em todas as fases do projeto.
- Os diagramas empregados demonstraram-se de fácil compreensão, pois alguns deles foram apresentados a pessoas que não atuam na área de usinas hidrelétricas e, após uma breve explicação para contextualização do assunto, foram entendidos.
- Os diagramas são consistentes, inclusive uns podem certificar outros. Por exemplo, realizando o diagrama de seqüência, podem-se observar algumas ações documentadas pelo Grafcet, verificando se estão corretas ou não. E vice-versa. Ou seja, o desenvolvimento pode ser interativo, sem perder a generalidade.
- Realizar todas as fases do projeto em uma mesma ferramenta comercial. Através do VISIO, pôde-se modelar usando rede C/A e Grafcet utilizando bibliotecas construídas para este fim, e integradas às existentes no VISIO. Fazer a modelagem em UML, inclusive tendo a disponibilidade de geração do código em C++

7.2 – PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS

- Construir todo o software para controlar os sistemas de funcionamento da usina;
- Construir uma interface mais agradável para o usuário, com ambientes visuais, utilizando-se janela e botões de acionamento;
- Verificar a necessidade de outros diagramas da UML que poderiam contribuir ainda mais para a documentação. Poder-se-ia empregar o diagrama de Atividades para explicitar algumas ambigüidades na interpretação dos diagramas de seqüência.
- Construir ferramentas que possam gerenciar o desenvolvimento do projeto de forma integrada com as ferramentas de projeto.

CAPÍTULO VIII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AARNIO, J. P. and RIITAHUHTA, A. O. Modularization of the control system in a mechatronic product. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN (ICED) 1., p. 555-562, 2001, Glasgow, Escócia. Proceedings... Glasgow, Escócia, Aug. 2001.

ABRAHÃO, E. M. **Metodologia para automação de pequenas centrais hidrelétricas**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEL), Minas Gerais, Itajubá.

ADPT Informes gerais do órgão. Disponível em <<<http://www.adtp.org.br/news/restrito/arquivo/news/010329-17.htm>>>. Acesso em 28/09/2001.

ANAEEEL Agência Nacional de Energia Elétrica. Informações gerais no sítio da agência. <<<http://www.anaeel.gov.br>>>. Acesso em 21/07/21.

APMPE - Associação Brasileira dos Pequenos e Médios Produtores de Energia <<<http://www.estado.estadao.com.br/editorias/2001/07/10/eco048.html>>>. Acesso em 08/10/2001

ATTIÉ, S. S., **Automação Hidráulica e Pneumática Empregando a Teoria de Sistemas a Eventos Discretos**. 1998. Dissertação(Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Engenharia de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis - SC.

BARACOS, P., Grafcet step by step. 1997. **Publicação eletrônica** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida baracos@altersys.com.

BERRY, J., Programando em C++. 1991. Tradução: Mário Moro Fecchio. Ed McGraw-Hill.

BOLLMANN, A., Fundamentos da automação industrial pneumática. 1996. Ed. ABPH (Associação Brasileira de Hidráulica e Pneumática).

BONFÈ, M. AND FANTUZZI, C. Mechatronic Object encapsulation in IEC 1131-3 Norm. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTROL APPLICATIONS, 2000, Anchorage, Alaska, USA. Proceedings... Alaska, USA, Sep. 2000. 25-27.

BOOCH, G., RUMBAUGH J. and JACOBSON, I., UML Guia do usuário. Tradução Fábio Freitas. Rio de Janeiro: Editora Campus, 2000. ISBN 85-352-0562-4.

BUUR, J. A theoretical approach to mechatronic design. 1990. Thesis (PhD in Mechanical Engineering) – Institutet for Engineering Design – Technical University of Denmark.

CARNEIRO, E. M. Critérios para modernização de usinas antigas e em operação. LAC/Copel, Revista Eletricidade Moderna, São Paulo, páginas 110-116, maio/1996.

CASTELANI, M., WIGGERS, E., BRAVO, R. R., **Projeto conceitual de um sistema de controle supervisão para pequenas centrais hidrelétricas**. 2000. Trabalho da disciplina EMC 6625 (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.

CERPCH, Itajubá (MG) EFEI, 1998. Anais eletrônicos... Disponível em: <<<http://www.cerpch.efei.br/artigos/artigo2.html>>>. Acesso em: 23/07/01.

CESP, Companhia Energética de São Paulo. Apostila

DE NEGRI, V.J. **Estruturação da modelagem de sistemas automáticos e sua aplicação a um banco de testes para sistemas hidráulicos**. 1996. 157 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

_____ Projeto de Sistemas de Automação Pneumática. Congresso e Exposição de Hidráulica e Pneumática. H&P Show. São Paulo. Outubro 2001.

FILHO, T. L. G., SANTOS, H. A., MONACO, G. A. M, Uma síntese do novo contexto institucional brasileiro referente ao aproveitamento hidrelétrico de pequeno porte. Disponível em: <<http://www.cerpch.efei.br/artigos/artigo_harley_e_august.html>>. Acesso em: 23/07/01.

FURLAN, J. D., Modelagem de objetos através da UML. Análise e desenho orientado a objeto. São Paulo: Ed. Makron Book do Brasil, 1998. ISBN 85-346-0924-1.

FURST, F. L., **Sistematização do Projeto Preliminar para Circuitos Hidráulicos de Controle de Posição**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

GAERTNER, N. e THIRION, B., Grafcet: na analysis pattern for event driven real-time systems. **Publicação eletrônica** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida de <<n.gaertner@essaim.univ-mulhouse.fr e b.thirion@essaim.univ-mulhouse.fr>> em ago. 2001.

GARCIA, H. E. et. ali. - A Reconfigurable Hybrid System and Its Application to Power Plant Control. IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 3, No. 2, june 1995.

GOUVINHAS, R.P, and CORBETT, J. A discussion on why design methods have not been widely used within industry. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN (ICED), p. 1166-1170, 1999, Munich, Alemanha. Proceedings... Munich, Alemanha, Aug. 1999.

HILDRE, P.H. e AASLAND, K. 1996. What is mechatronic? In John Sharpe, editor, AI System Support for Conceptual Design. Proceedings of the 1995 Lancaster International Workshop on Engineering Design, pages 391-404. Springer, Berlin, 1996.

HILDRE, P. H., Design Methodology. Disponível em: <<http://www.sintef.no/units/matek/projects...onic%20design/design_meth/design_meth.htm>>. Acessado em: 24/02/2000.

HUSSEIN, B.A 2000. On modelling mechatronics systems – a geometrical approach. Mechatronics (10) 2000. Ed. Elsevier Science Ltd.

IEC. International Electrotechnical Commission. IEC 1131: Programmable Controllers – Programming Languages. 1993.

JÚDEZ, G. Z., Centrales hidroeléctricas su estudio, montaje, reglación y ensayo. 1965. Ed. Gustavo Gili.

JUNIOR, N., Z. **Controle da excitação de geradores de usinas hidrelétricas: Modelagem, Identificação, ajustes e ensaios de campo.** 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

KAJITANI, M. Mechatronic system application. In: Mechatronics in engineering design and product development. 1 ed. Marcel Dekker: EUA, 1999. Cap 12. ISBN 0-8247-0226-3

KALJAS, F. and REEDIK, V. On synergistic aspects in integrated product development of mechatronic systems. Ed. Elsevier Science Ltd.

KORPETA, T., The Role of Object-Oriented Analysis in Modelling of Technical Processes. Tapio Korpela. Internation. Conference on Engineerin Design ICED 99, Munich, Germany. V2 p.853-856.

LEE, R. C., UML and C++: a practical guide to object-oriented development. 1997. AT&T and Lucent Technologies. New Jersey. Ed. Prentice-Hall, Inc. ISBN 0-13-619719-1.

LIPPOLD, C., WELP, E. G. Multi-domain configuration system for analysis and synthesis of mechatronic conceptual designs In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN (ICED), 2., 1999, Munich, Alemanha. Proceedings... Munich, Alemanha, Aug. 1999.

LITTLER, D. J., Modern power station practice. Third Edition. British Electricity Ineternational. Pergamon Press.

LÜCKE, H. A. e DE NEGRI, V. J. Uma metodologia integrada para o desenvolvimento de Sistemas automáticos. In: 2 Congresso Interamericano de Computación a la Industria de Processo, 1994, Santiago - Chile. Anais... Santiago: CIT, 1994. 290 p.6-13.

MACAUGHLIN, M. J. and MOORE, A., Real-time, and extensions to UML. Timing, concurrency, and hardware interfaces.

Disponível em:<<<http://www.ddj.com/articles/1998/9812/9812g/9812g.htm?topic=realtime>>>. Acesso em: 01/08/00.

MACINTYRE, A. J., Máquinas motrizes hidráulicas. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1983. 649 p. ISBN 85-7030-016-6.

MADEIRA, N. M., **Orientação por objetos aplicada à automação industrial: objeto imagem**. 1995. 147 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Computação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MARTÍNEZ, P., FERREIRO X.C., GARCÍA, R. & VIDAL PAZ, J. SFC++: A tool for developing distributed real-time control software. **Publicação eletrônica** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida de pardo@des.fi.udc.es, ferreiro@des.fi.udc.es e vidal@des.fi.udc.es

MCSE, Méthodologie de Conception des Systèmes Electroniques. Disponível em <<<http://www.Ireste.fr/mcse/htmlan/presentation-1.html>>>. Acesso em: 01/2001.

MODERN POWER STATION PRACTICE. In: British Electricity International. Ed. 3. Volume C.

MOREIRA, M. A. R. G., PINAUD, Z. R., BARRETO, C. A., FREITAS M. A. V., Alguns tipos de instalações, sistemas e componentes. In: CERPCH, Itajubá (MG) EFEI, 1998. Anais eletrônicos... Disponível em:<<<http://www.cerpch.efei.br/artigos/artigo1.html>>>. Acesso em: 23/07/01.

PAES, F. H. S., Programa de implementação do Coordenador Geral. In: LASHIP, Florianópolis (SC), 2001. Disponível em <<<http://www.fredpaes.hpg.com.br>>>. fredpaes17@hotmail.com Última atualização em 1/11/2001.

PEREIRA, C. e FRIGERI, A.H., OORTAC: Um Método de Desenvolvimento de Sistemas de Automação em Tempo Real Usando Técnicas de Orientação a Objetos. XI Congresso Brasileiro de Automática, 1996, pp. 1285-1290.

PEREIRA, S. B. IEC 1131, padrão de programação. Revista IPESE – Eletrônica & Informática, São Paulo, p. 22-23, Julho/Agosto de 1997.

POPOVIC, D. and VLACIC, L. 1999. Mechatronics in engineering design and product development. 1 ed. Marcel Dekker: EUA, 1999.

RATIONAL, Unified modeling language for real-time systems design. Disponível em: <<<http://www.isg.de/people/marc/UmlDocColle...n/UMLForReal-TimeSystemsDesign/umlrt.html>>>. Acesso em: 22/07/00.

RAULT, A Mechatronics and bod graphs. In: BOND GRAPHS FOR ENGINEERS, 1992, North-Holand: Breedveld, 332 p. p.101-110.

REIVAX Automação e Controle. Reguladores de velocidade e tensão (RTVX). <<<http://www.reivax.com.br>>>. Acesso em mar. 2001.

RUMBAUGH, J., BLAHA, M. PREMERLANI W., EDDY, F. AND LORENSEN W. Object-Oriented Modeling and Design. Prentice-Hall, 1996.

SAAD, J. J. Integração da Supervisão, controle e proteção em usinas e subestações. - Revista Eletricidade Moderna, Seção Automação página 113, dezembro de 1996.

SACCONI, L. A. (Ed.). Minidicionário SACCONI da língua portuguesa. Editora Atual. São Paulo, 1998. Edição exclusiva para professores, venda proibida.

SÃO PAULO. Companhia Energética de São Paulo. Divisão de Geração. Setor de normas de geração. Instrução TM/047/1979: sistemas de regulação de turbinas hidráulicas. 1979.

SCHILDT, H., C++ para programadores. 1999a. Madri. Tradução para o espanhol: Eduardo Jimenez Ferry. Ed McGraw-hill, Inc. ISBN 0-07-882140-1.

_____. C++ completo e total. 1997b. Tradução e revisão técnica: Jeremia dos Santos. São Paulo: Makron Books. ISBN 85-346-0813X

SCHÖN, A. e MEERKAMM, H., Components for a Mechatronic Design Workbench. Internation Conference on Engineerin Design - ICED 99, Munich, Germany. V 2. p1202-1208.

SCHREIBER, G. P. Usinas hidrelétricas. Rio de Janeiro: Engevix, 1997.

SHAKERI, A. **A methodology for development of mechatronic systems**. 1998. 158f. Thesis (Ph.D in Mechanical Engineering) – Institute for Telematic, Norwegian University of Science and Technology, NTNU. Trondheim.

SHAOYING, L. SOFL: A Formal Engineering Methodology for Industrial Application. IEEE Transations on Software Engineering, Vol. 24, n. 1, p. 24-45, January 1998.

STACH, W. and REIMANN, M. – Modernizing control and excitation systems – Water Power & Dam Construction – october 1991.

SONG, X. System Integration fo Design Methods. Magazine IEEE Software, p.107-117, march/april 1997. Computer Society.

UML, Specification 1.3. Disponível em: <<<http://www.rational.com>>>. Acesso em: Julho/2000.

VALÁSEK, M. 1998. Mechatronic system design methodology – Initial principles based on case studies. Mechatronics 98. Ed. Elsevier Science Ltd.

VIANA, A. N. C e ALENCAR H. S. Características Operacionais da Aplicação da Rotação Variável em Turbinas Francis. In: CERPCH, Itajubá (MG) EFEI, 1998. Anais eletrônicos...

WHITTAKER, T.J.T., THORNHILL, S LU and D MICHELL, D., S Integration of design systems for energy related applications. Design Studies, Great Britain, v.16, n.4, p.415-428, Oct. 1995.

XOÁN, C. P. M., AND RAMÓN, F.G. An object-orientated static meta-model for sequential function charts. **Publicação eletrônica** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida de pardo @des.fi.udc.es e ferreiro@des.fi.udc.es

_____. Initial design of a virtual machine to play grafcet models. **Publicação eletrônica** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida de pardo @des.fi.udc.es e ferreiro@des.fi.udc.es

ZEVE, D. M. C., **Uma linguagem visual para especificação de projetos de automação industrial**. 1995. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS.

