

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

JANEIRO DE 1990

SISTEMAS HIERÁRQUICOS MULTINÍVEIS EM AUTOMAÇÃO E CONTROLE

*Este trabalho contém
fórmula de tese aprovada por Felício
Cestari Filho e aprovada pelo
Conselho Julgador em 07/05/90*

Fernando
Prof. Dr. FERNANDO GOMIDE
DCA/FEE/UNICAMP

por : Felício Cestari Filho

orientador : Prof. Dr. Fernando Antonio Campos Gomide

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica,
da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos
requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Elétrica.

Dedico à
Malu, Renata, João Marcelo

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos ao Prof. Fernando A. C. Gomide pela orientação objetiva e atenção especial dedicada a este trabalho e, principalmente, pela amizade e incentivo durante toda a evolução do trabalho.

Gostaria de expressar também minha gratidão aos amigos da MAP/CTI pelo apoio e compreensão e ao CPqD TELEBRÁS pelo apoio institucional.

RESUMO

Sistemas de grande porte são frequentemente caracterizados por uma estrutura hierárquica, e possuem normalmente múltiplos objetivos que podem ser conflitantes.

A modelagem de um sistema deste tipo é normalmente uma tarefa árdua e de solução difícil. Assim, este estudo procura prover uma metodologia de abordagem de sistemas de grande porte integrados, usando a teoria hierárquica multinível. Além disso, é feita uma descrição das funções e fluxo de informações entre os diversos níveis da hierarquia. É elaborado um exemplo usando a metodologia proposta onde é feita a descrição formal da estrutura hierárquica, os modelos matemáticos que representam o sistema, e a implementação de uma estrutura de suporte à tomada de decisão.

O exemplo apresentado contempla uma parte da Aciaria (conversor e metalurgia de panela) dentro do contexto de uma usina siderúrgica integrada onde são experimentados e analisados alguns casos via simulação.

ABSTRACT

Large-scale systems are often characterized by hierarchical structures, and they usually have multiple objectives that may be conflicting. The modelling of large-scale systems is normally a difficult task and of complex solution. This study aims at providing an integrated, large-scale system analysis methodology, using the theory of hierarchical multilevel systems. Moreover, the functions and information flows between the levels are described. An example is developed using the proposed methodology. The formal hierarchical structure description, the mathematical models that represent the system as well as development of a decision-making support structure are elaborated.

The example considered is part of a steelmaking plant (BOF and ladle metallurgy) of an integrated steel plant. Simulation results are presented and analysed.

Resumo	iv
Abstract	v
1 - Introdução	
1.1 - Motivação	1.1
1.2 - Objetivos do Trabalho	1.2
1.3 - Organização do Trabalho	1.3
1.4 - Revisão Bibliográfica	1.3
2 - Especificação Funcional de Sistemas Integrados	
2.1 - Introdução	2.1
2.2 - Aplicação da Modelagem Hierárquica	2.1
2.3 - Fluxo de Informação entre Níveis	2.7
2.4 - Resumo	2.19
3 - Controle Hierárquico em Processos Siderúrgicos	
3.1 - Introdução	3.1
3.2 - Descrição do Processo	3.1
3.3 - Modelagem do Processo	3.9
3.3.1 - Modelo do Conversor (Processo 1)	3.9
3.3.2 - Modelo de Metalurgia de Panela (Processo 2)	3.15
3.4 - Resumo	3.18
4 - Implementação e Análise de Resultados	
4.1 - Introdução	4.1
4.2 - Definição do Problema	4.1
4.3 - Descrição da Implementação	4.3
4.3.1 - Supervisor 1	4.3
4.3.2 - Supervisor 2	4.4
4.3.3 - Coordenador	4.6
4.3.4 - Sistema de Suporte à Decisão	4.7
4.4 - Resultados Obtidos e Análise	4.9
4.5 - Resumo	4.20
5 - Conclusões e Sugestões	5.1
Bibliografia	B.1

C A P Í T U L O 1

INTRODUÇÃO

1.1 - MOTIVAÇÃO

A informação, como um bem necessário à tomada de decisões, juntamente com a produção, comercialização e finanças passou a fazer parte intrínseca da gestão da empresa moderna, a partir do momento em que os recursos computacionais possibilitaram o processamento contínuo de grandes volumes de dados.

A nível de operação, a informação normalmente se apresenta estruturada, cientificamente previsível, e tem um tratamento para atender os objetivos específicos da empresa. À medida que o nível de gerência evolui da operação para as áreas de controle, administração e direção, a informação vai perdendo sua forma pragmática, adquirindo em substituição conteúdos subjetivos. Somente a direção é capaz de discernir com clareza e permanecer na perseguição dos objetivos. Neste nível os dados e informações de origem externas são indispensáveis.

Assim, um sistema de informação eficaz deve não só controlar máquinas e processos e fornecer dados e relatórios, possibilitando a visão ampla do que está ocorrendo na empresa, mas principalmente transformar-se numa das ferramentas básicas para tomada de decisões. Os dados, como matéria prima, são processados até se transformarem em informações úteis e apropriadas ao nível do usuário a que se destina.

Sistemas modernos de processamento de dados voltados para a gestão estão hoje baseados em tecnologias de bases de dados, tempos compartilhados, teleprocessamento, redes e sistemas distribuídos ("on-line"), automação de escritórios, e controle de processos em tempo real. Na medida do possível os diversos subsistemas devem ser funcionalmente integrados.

Os avanços ocorridos na área de controle de processos com emprego de técnicas digitais tem proporcionado não só maior flexibilidade funcional como também facilitado a integração e interfaceamento do processo com os computadores e operadores de supervisão. Usam-se de forma crescente, microcomputadores interligados por redes locais (LAN) a outros subsistemas geograficamente distribuídos, compondo um sistema integrado de informação e controle.

Associado a estes avanços, o presente estudo busca analisar as capacidades de uma estrutura de controle hierárquica para as atividades de suporte à tomada de decisão e funções de controle envolvidas em um sistema de produção. O processo de produção de aço líquido (Aciaria) baseado em sopro de

oxigênio foi selecionado como o sistema a ser estudado. Várias razões podem ser mencionadas para justificar a conveniência da distribuição, descentralização e controle hierárquico, porém neste trabalho objetiva-se mostrar que modelos simplificados associados com subproblemas levam a resultados semelhantes ao problema global, em geral complexo e com modelos matemáticos de solução nem sempre possível.

1.2 - OBJETIVOS DO TRABALHO

Projetos bem sucedidos de sistemas de grande porte e complexos invariavelmente envolvem decomposição do sistema em um número de subsistemas menores, cada qual com seus próprios objetivos e restrições. A interconexão resultante dos subsistemas pode tomar muitas formas, mas uma das mais comuns é a forma hierárquica na qual uma unidade de um certo nível controla ou coordena as unidades do nível abaixo e assim sucessivamente.

No caso de otimização estática de um processo de grande porte (ex; siderurgia, refinaria, celulose) tem sido despendido considerável esforço para o uso de computadores em tempo real para executar esta função. Nestes casos, é impossível um sistema de otimização integrado para o processo como um todo. Isto porque o tempo requerido para instalar tal sistema pode ser facilmente ultrapassado pelas alterações do processo devido a avanços tecnológicos. Consequentemente, é necessário decompor o problema em um número de problemas menores e resolvê-los um por vez. Deve-se considerar a existência de objetivos globais do processo como um todo e a solução dos subsistemas deve ser tal que estes objetivos sejam alcançados. [WISMER, 1971]

Os principais objetivos deste trabalho são:

- 1 - Descrever uma metodologia de abordagem de sistemas de grande porte via modelagem hierárquica;
- 2 - Descrever as funções e os fluxos de informações entre níveis para uma dada estrutura hierárquica de um sistema produtivo;
- 3 - Desenvolver um modelo de um sistema aplicando a metodologia proposta;
- 4 - Avaliar o comportamento do sistema.

1.3 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Após este breve esboço da motivação para pesquisa e objetivos, a seção 1.4 deste capítulo faz uma revisão da literatura. A especificação funcional de sistemas integrados é considerada no capítulo 2. No capítulo 3 é feita uma descrição do processo a ser considerado como exemplo de aplicação e apresentados os modelos matemáticos que descrevem os sub-processos. A estrutura do software do sistema de suporte à tomada de decisão desenvolvido é apresentada no capítulo 4, incluindo as funções objetivos e restrições de cada subsistema. Exemplos numéricos, resultados computacionais e análise são feitos também neste capítulo. No capítulo 5, apresentam-se as conclusões e propostas para pesquisas futuras.

1.4 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Um sistema hierárquico constitui uma aproximação muito natural para dar suporte a uma grande variedade de decisões complexas encontradas no gerenciamento de processos de produção. Isto se deve à :

- 1 - Métodos analíticos disponíveis não são adequados ao desenvolvimento e solução de um modelo único que otimize um sistema produtivo como um todo. Isto explica a necessidade de particionar o problema global em subproblemas;
- 2 - Os níveis hierárquicos representando um sistema, normalmente correspondem à estrutura organizacional de uma empresa, o que facilita a interação com as saídas do sistema e as responsabilidades do gerente de cada nível;
- 3 - O sistema hierárquico permite coordenação efetiva por toda a estrutura organizacional, estabelecendo sub-objetivos consistentes para cada nível [HAX, 1975].

Esta idéia de representação hierárquica de sistemas possui referências relativamente antigas [HEIDPRIEM, 1977], onde esboços de sistemas de automação hierárquicos para uma siderúrgica integrada são apresentados.

Esquemas como citados por Heidepriem e similares tem servido como base no processo de automação de algumas usinas siderúrgicas, porém a realizabilidade destes projetos encontrou diversos fatores técnicos (hardware e software disponíveis) e metodológicos que os impediam, mesmo na fase de planeja-

mento.

Uma formalização para este tipo de abordagem é iniciada por Mesarovic e seus colaboradores [MESAROVIC, 1970] para estabelecer uma teoria matemática geral de sistemas multiníveis. A idéia central deste tipo de abordagem é considerar que os sistemas podem ser descritos através de uma estrutura tipo organizacional, onde se pode identificar a forma piramidal dos problemas de decisão e objetivos, os quais variam em complexidade e dimensão. Isto implica que a teoria de sistemas multiníveis foi desenvolvida para fornecer um modelo de uma organização consistindo de interconexões de subsistemas de tomada de decisão, de forma que o controle descentralizado seja tão eficiente quanto um equivalente centralizado.

No tratamento de sistemas complexos de grande porte, três noções básicas de níveis são possíveis :

1 - Nível de Descrição ou Abstração

Descreve o sistema através de uma família de modelos referentes ao comportamento do sistema visto de diferentes níveis de abstração. Para cada nível, existe um conjunto de características e variáveis relevantes, leis e princípios pelos quais o comportamento do sistema é descrito. Para uma descrição hierárquica efetiva, é necessário que o funcionamento em qualquer nível seja tão independente de outros níveis quanto possível;

2 - Nível de Complexidade de Decisão

Esta hierarquia trata da complexidade dos processos de tomada de decisão em sistemas de grande porte. Os níveis desta estrutura são chamados de camadas. A operação dos sistemas em multicamadas depende da comunicação nos dois sentidos entre os subsistemas dos diversos níveis e inclui a determinação das estratégias usadas, redução das incertezas através de métodos apropriados, e a seleção da função de intervenção a qual, por sua vez, é aplicada nos subprocessos;

3 - Hierarquia Organizacional

Este tipo de hierarquia é a mais geral, uma vez que considera a existência de metas e objetivos conflitantes entre os subproblemas de decisão. Os níveis mais altos têm a responsabilidade de resolver a interação entre as unidades dos níveis inferiores através de acoplamentos e restrições apropriadas, manipulando incertezas e conflitos de objetivos (figura 1.1).

É importante notar que um sistema multinível pode ser descrito em

termos das três noções e que, embora diferentes, as três hierarquias exibem

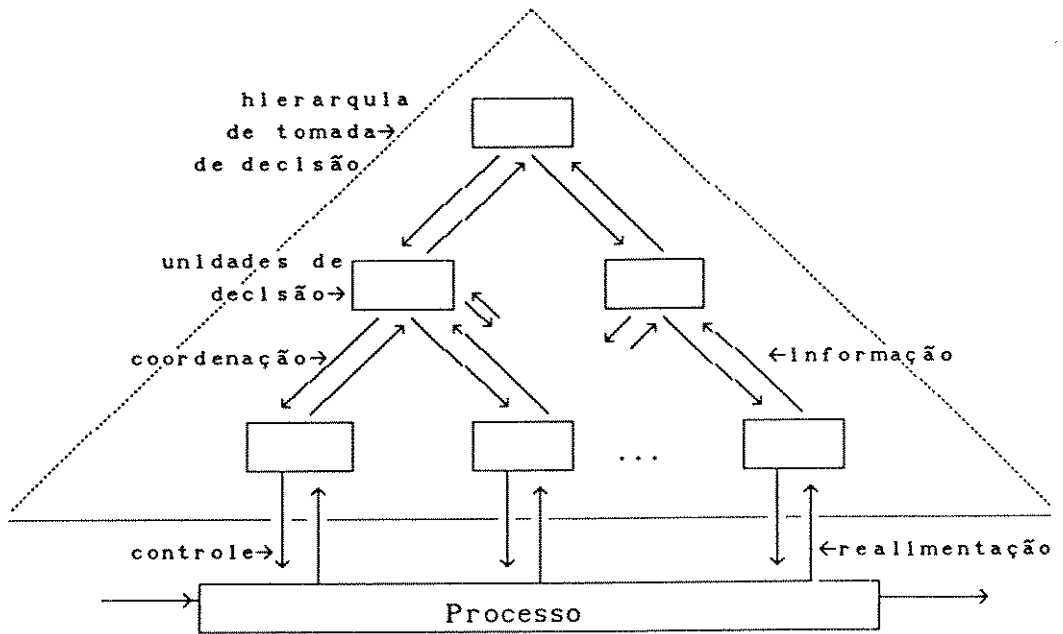


Fig. 1.1 - Hierarquia Organizacional Multinível

características comuns. Algumas características são :

- 1 - As unidades superiores são mais relacionadas com o escopo global das funções do sistema;
- 2 - Os níveis mais altos sofrem mudanças dos pontos de operação mais lentamente e têm tempos de decisão maiores;
- 3 - Os problemas dos níveis mais altos são menos estruturados e contêm um maior grau de incerteza [MACKULAK, 1979].

Mesarovic descreve uma configuração de computadores em uma siderúrgica como uma hierarquia complexa exibindo as três características acima citadas. Em particular, as aplicações de maior sucesso e extensivas em sistemas de controle computadorizados de grande porte têm sido nas indústrias de produção de aço japonesas [INOUE, 1981]. Sistemas similares têm sido objetivo em diversas usinas siderúrgicas pelo mundo [BROEKHUIS, 1977], [HEIDPRIEM, 1977], [LONG, 1979]. Furukawa e colaboradores [FURUKAWA, 1981] desenvolveram um método de coordenação "on-line" para um sistema de controle discreto linear quadrático de dois níveis para um processo de forno elétrico a arco baseado na teoria de sistemas hierárquicos multiníveis.

Outros segmentos da indústria têm considerado de grande importância a implementação de sistemas integrados computadorizados, Exemplos incluem a

indústria de papel [BRYANT, 1986] e petroquímica [PIERRON, 1986].

Além de aplicações industriais, Senborn [SENBORN, 1983] e colaboradores desenvolveram um sistema de controle de tráfego de Belgrado baseado em estrutura hierárquica, consistindo em um sistema de dois níveis e cinco sub-áreas.

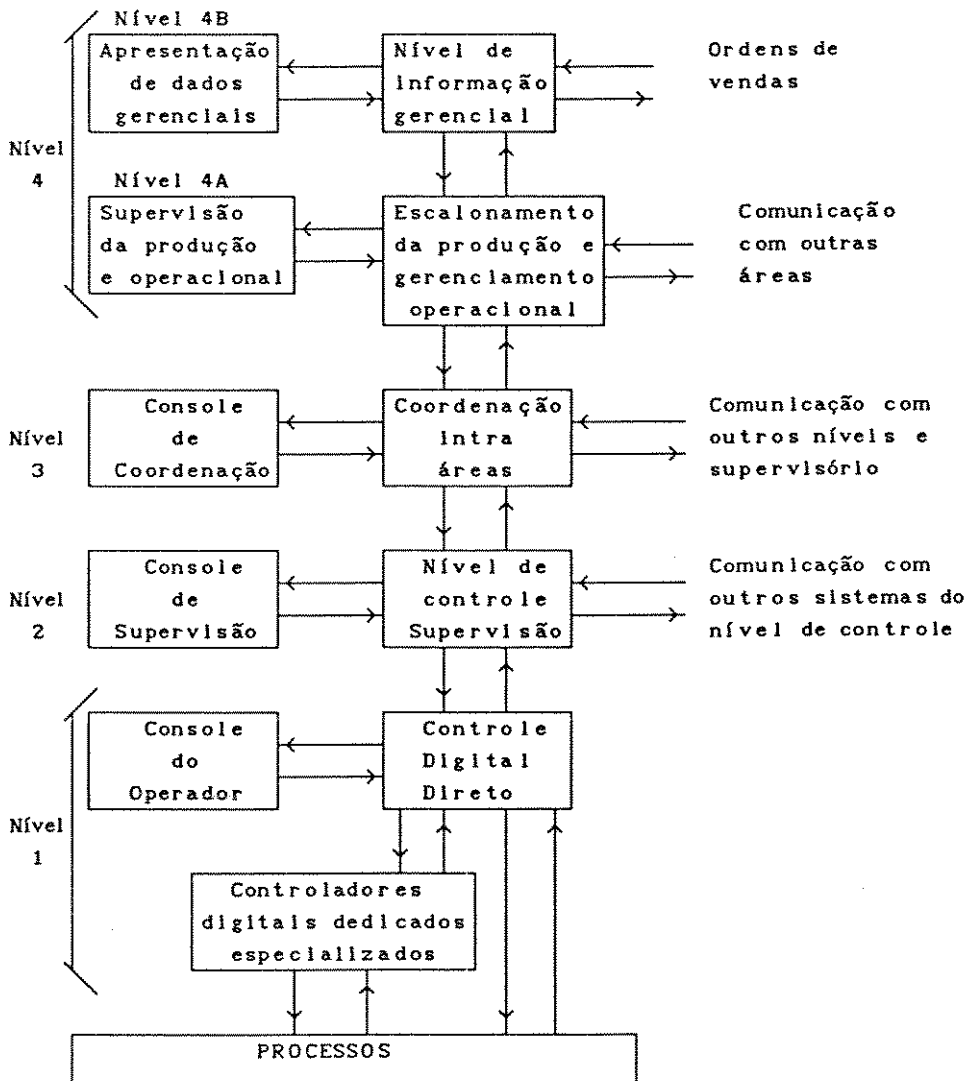


Fig 1.2 - Estrutura de controle hierárquico para processos contínuos.

Como se pode notar, um arranjo hierárquico de um sistema de controle distribuído baseado em computador parece ser bastante adequado para a automação de plantas industriais e controle de sistemas sócio-econômicos. As figuras 1.2 e 1.3 mostram uma possível forma de um sistema de controle hierárquico distribuído para o caso de automação industrial. Note-se que a figura 1.2 usa a nomenclatura comum para o caso de indústrias de processos contínuos, enquanto a figura 1.3 apresenta a nomenclatura para as indústrias de manufa-

tura (ou sistemas de manufatura integrados, "CIM"). Deve-se salientar que apesar da nomenclatura diferente nas figuras 1.2. e 1.3 , a maior diferença

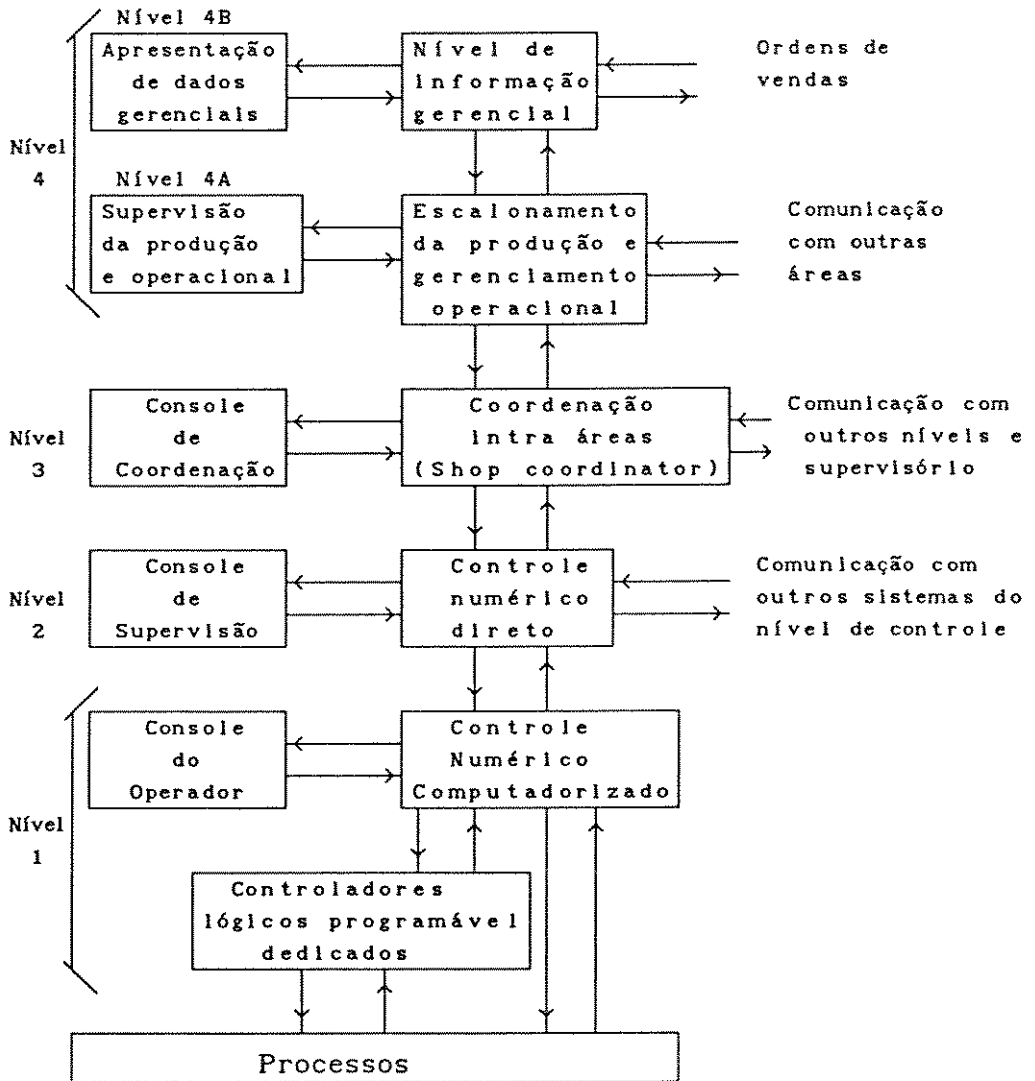


Fig 1.3 - Estrutura de controle hierárquico para processos discretos.

está concentrada nos detalhes da tecnologia de controle dinâmico envolvida no nível 1 e nos detalhes dos modelos matemáticos usados para otimização do nível 2. Técnicas de comunicação e interfaces são exatamente as mesmas para ambos os sistemas, bem como os algoritmos de otimização e tecnologias de sistemas de computadores e programação. Além disso, metodologias similares de planejamento, programação e sequenciamento de produção são usadas para ambos os sistema [WILLIANS, 1987].

Paralelamente ao desenvolvimento das aplicações de sistemas hierárquicos integrados, houve durante as duas décadas passadas um desenvolvimento

acentuado da teoria de sistemas hierárquicos, apresentada em diversos artigos [MAHMOUD, 1977], [NACHADE, 1984], [FINDEISEN, 1982].

Otimização multi-objetivo têm se expandido da área de otimização estática para sistemas dinâmicos [SALUKVADZE, 1979], e atualmente têm se tornado um componente importante da teoria de controle. Viu-se também um aumento acentuado no esforço de integração da teoria de sistemas hierárquicos e otimização multi-objetivo em torno de uma estrutura unificada para sistemas de grande porte [TARVAINEN, 1982]. Este objetivo têm se manifestado em uma variedade de campos, tais como problemas de alocação de recursos, sistemas de recursos hídricos e modelos de planejamento ambiental e regional [COHON, 1978].

Finalmente, pesquisas recentes com o intuito de promover uma síntese da otimização multi-objetivo e otimização multi-nível têm aberto um novo campo na análise de sistemas hierárquicos multi-objetivos [HAIMES, 1988].

Apesar de várias atividades de tomada de decisão já terem sido identificadas e até automatizadas, conforme apresentado em outras referências, os procedimentos para a identificação e formalização destas atividades ainda estão em forma dispersa na literatura. Além disso, as atividades de tomada de decisão são apresentadas como problemas de otimização, sendo que em alguns casos estas atividades são tratadas simplesmente como relacionamentos de entrada e saída.

Portanto, os principais propósitos de se definir um procedimento com o objetivo de identificar as funções e fluxos de informações de forma hierárquica são :

- 1 - A caracterização formal de cada problema, numa formalização compacta e consistente;
- 2 - Uma estrutura considerando as funções de tomada de decisão e controle envolvidas em um sistema produtivo e classificando estas funções em termos dos interrelacionamentos e prioridades;
- 3 - Definir explicitamente as funções objetivo de cada nível e restrições.

C A P Í T U L O 2

ESPECIFICAÇÃO FUNCIONAL DE SISTEMAS INTEGRADOS

2.1 - INTRODUÇÃO

Sistemas integrados são um conjunto de subsistemas que, interconectados através de uma via de comunicação, compartilham dados e informação uns com os outros, executando tarefas de acordo com uma hierarquia funcional multinível.

O objetivo deste capítulo é indicar um procedimento para identificar as tarefas e as funções que compõem um sistema, de forma a associá-las aos níveis hierárquicos. Para isso, é considerada uma abordagem através de análise da estrutura organizacional e funcional de um sistema produtivo para definir as funções, procurando a seguir formas de representação dos relacionamentos entre as funções.

É estabelecido também um modelo hierárquico para integração das funções de controle e de gerenciamento de um sistema, de forma a explicitar as tarefas e funções.

2.2 - APLICAÇÃO DE MODELAGEM HIERÁRQUICA

Um sistema produtivo deve coordenar suas operações em um universo comercial. As informações mais importantes acerca do mercado no qual o sistema opera são o conhecimento atualizado dos clientes e competidores, a disponibilidade de pessoal e o conhecimento das fontes de suprimentos. O aumento dos preços dos materiais usados, elevação do custo da mão de obra, e competição externa induzem à necessidade de um sistema de informação que relaciona o ambiente do sistema produtivo com o meio externo, de forma a propiciar uma coordenação sobre o sistema de informação. A figura 2.1 mostra o relacionamento dos fatores internos e externos para um sistema produtivo. Pode-se notar que um sistema produtivo é composto basicamente dos itens materiais, máquinas, pessoal e dinheiro. O objetivo do sistema hierárquico é gerenciar e controlar estes quatro itens, de tal maneira que seja possível criar um mapeamento da informação do nível mais alto (gestão), até a informação (ou dado) do nível mais baixo da hierarquia (controle direto ou atuação no processo físico) [THIERAUF, 1982].

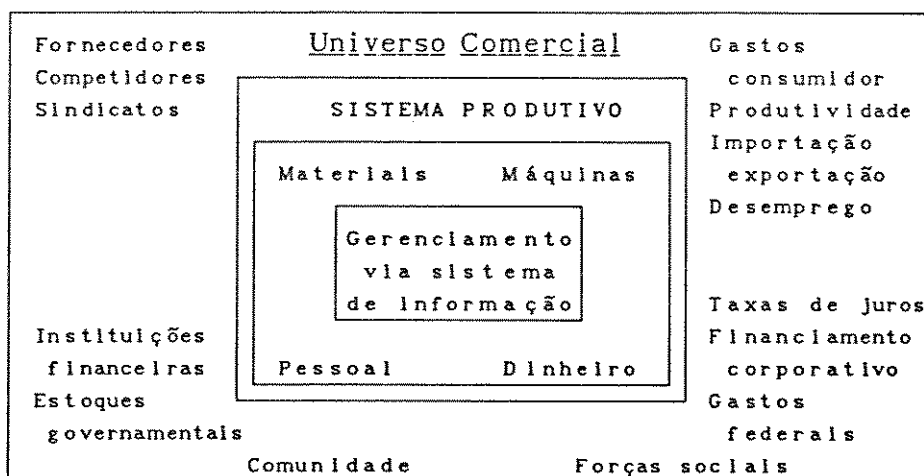


Fig 2.1 - Relacionamentos do sistema produtivo com fatores internos e externos.

É claro que a modelagem destes quatro itens para um sistema de grande porte (ex., siderúrgicas, refinarias, montadoras, etc.) e a respectiva solução é uma tarefa ambiciosa, sendo então necessária a decomposição do sistema em diversos níveis, de forma a reduzir a ordem do problema e consequentemente encontrar uma solução apropriada.

O passo crucial no processo de elaboração do modelo é a seleção de uma estrutura para o modelo do sistema que se está considerando. Assim, começar uma modelagem a partir de um modelo matemático detalhado do sistema composto de subsistemas interrelacionados pode não ser uma boa estratégia de abordagem do problema, pois o número de informações envolvidas é muito grande, o que pode dificultar um melhor entendimento do sistema como um todo, e em muitos casos impedir que sejam delineados os subsistemas e seus interrelacionamentos.

A representação de sistemas por meio de diagramas de blocos auxilia na análise estrutural do sistema como um todo, sem levar em consideração qualquer formalismo matemático na representação do sistema. A figura 2.2 apresenta o procedimento adotado na análise de sistemas [MESAROVIC, 1975].

A descrição verbal é normalmente a forma mais usual de especificar um sistema. É uma narrativa textual do que é o sistema e como ele funciona (ver capítulo 3), sendo muitas vezes ambígua e imprecisa.

Para o caso de sistemas de produção (manufatura ou processos contínuos), a análise da estrutura organizacional da empresa, associada à descrição verbal, possibilita um melhor entendimento do sistema e, consequentemente, a elaboração de um diagrama de blocos o qual, por sua vez, é um modelo gráfico

para o sistema [THIERAUF, 1982].

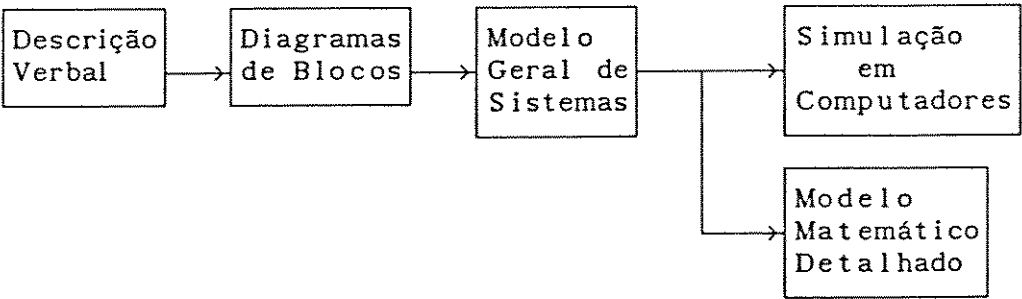


Fig. 2.2 – Procedimento para análise de sistemas

A figura 2.3 mostra um organograma simplificado de uma usina integrada

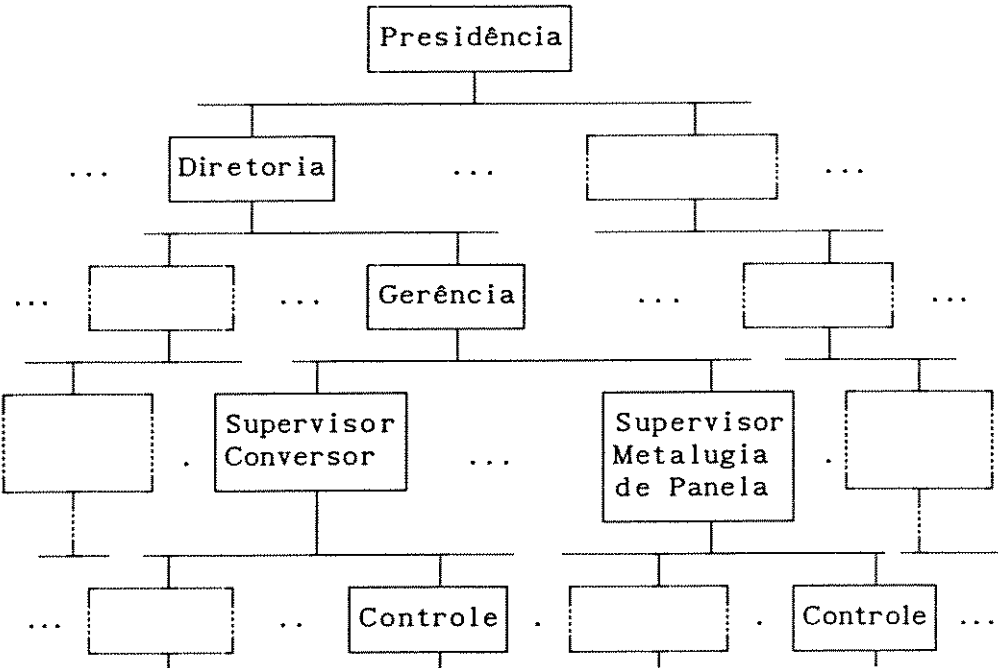


Fig 2.3 - Estrutura organizacional integrada de produção de aço.

de produção de aço, a ser considerada como exemplo de um sistema produtivo. A partir desta figura e da descrição verbal (capítulo 3), pode-se gerar um diagrama de blocos (figura 2.4) onde aparecem os diversos subsistemas, com os relacionamentos entre si representados pela troca de informações.

Uma vez definidas as funções de cada subsistema e de como estas funções são compostas, bem como as informações que são trocadas, pode-se então procurar uma forma de representação destes relacionamentos.

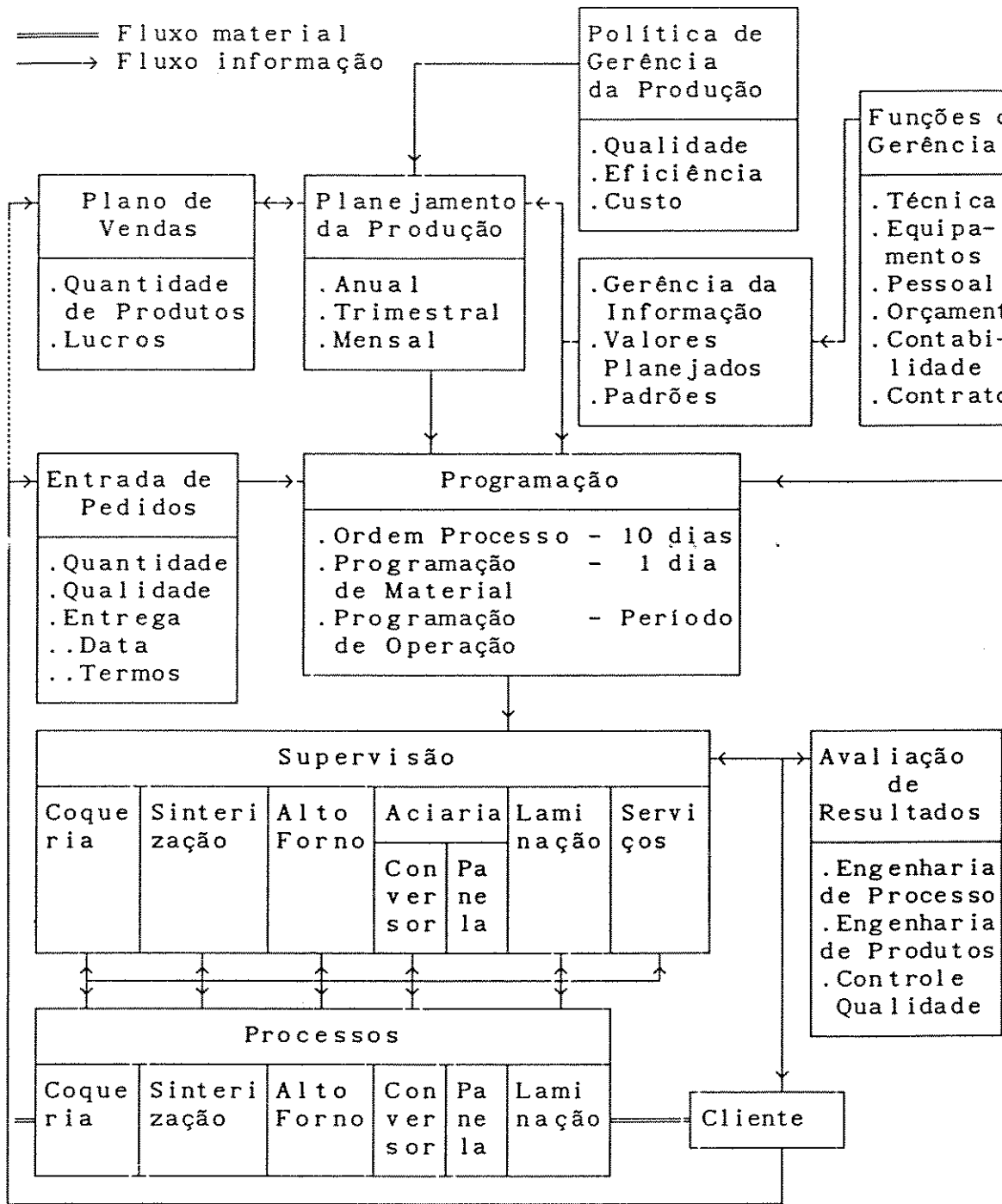


Fig. 2.4 - Diagrama de blocos de uma usina siderúrgica.

Uma primeira abordagem seria a montagem de um diagrama multicamadas da empresa (figura 2.5). Neste diagrama procura-se colocar em cada camada as funções semelhantes, de forma agrupada, das diversas áreas que compõem a empresa, isto é, todas as fábricas são designadas como controle de processo,

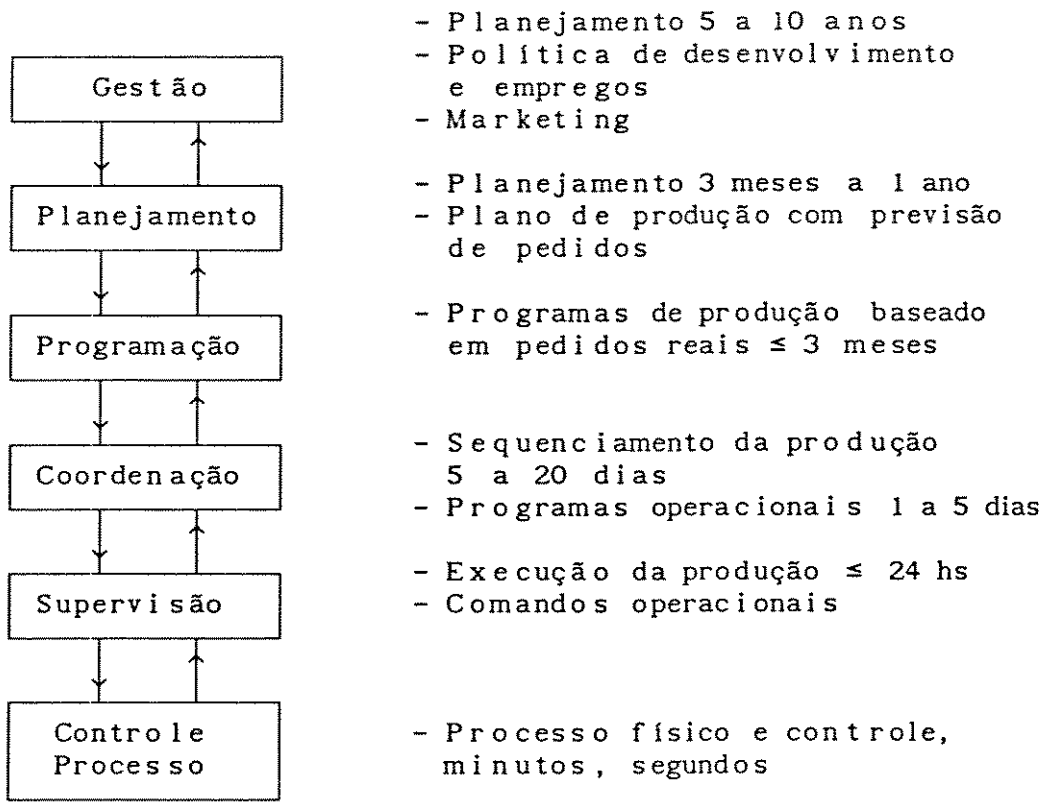


Fig. 2.5 - Arranjo multicamadas para uma usina siderúrgica.

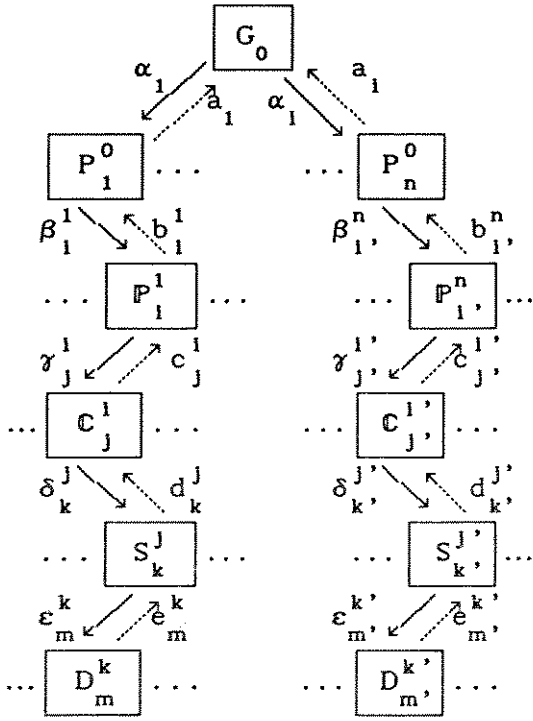


Fig. 2.6 - Representação hierárquica multinível.

os subsistemas de controle operacional como supervisão, etc [FINDEISEN, 1980].

Uma segunda abordagem seria a construção de diagramas que representam os níveis hierárquicos da empresa (figura 2.6). Este tipo de representação possibilita apresentar um número maior de detalhes do sistema, mostrando quantas entidades pertencem a um determinado nível e qual o número de informações trocadas entre os níveis. Uma vantagem adicional da representação hierárquica multinível é que, em muitos casos, ela se assemelha ou induz a estrutura organizacional da empresa, podendo desta forma tirar como uma análise suplementar a avaliação do dimensionamento de cada função dos níveis e verificar se o fluxo de informações está adequado para aquela função.

Uma terceira forma de representação seria a construção de matrizes de relacionamento (figura 2.7). Este tipo de representação mostra os relacionamentos entre as diversas funções do sistema, tanto entre níveis como entre entidades de um mesmo nível.

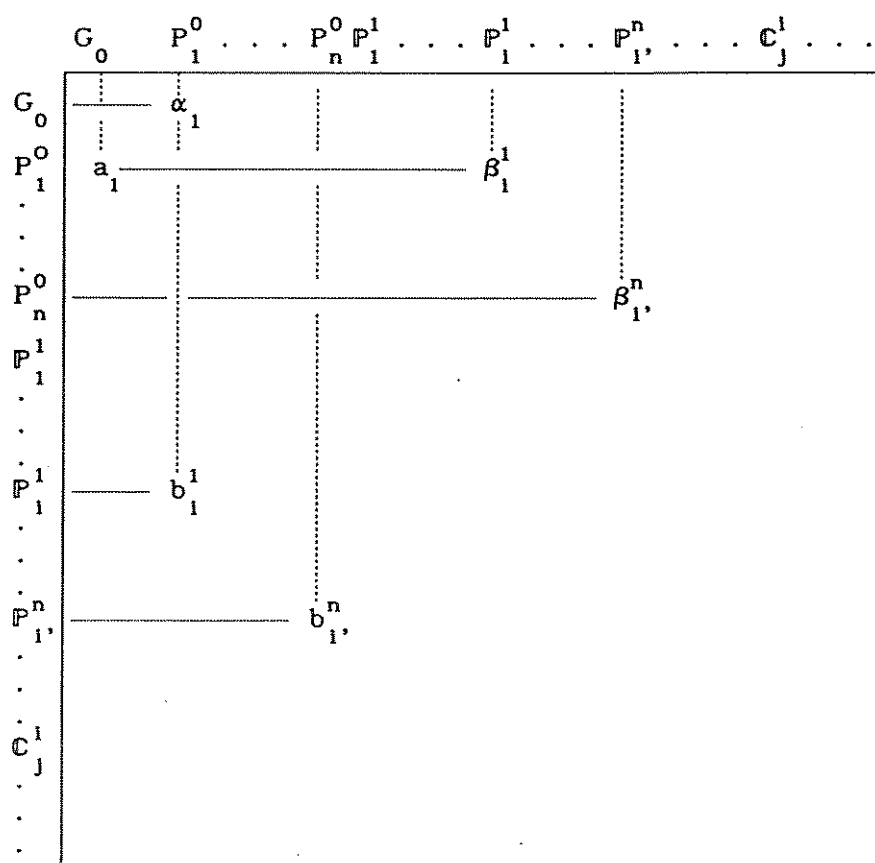


Fig. 2.7 - Matriz de relacionamentos.

Para todas as formas de representação, pode-se criar um mapeamento que é formalizado de acordo com os objetivos do nível em que se encontra e das

funções do nível associado (ver item 2.3).

Estes procedimentos acima descritos podem ser resumidos conforme o seguinte algoritmo:

- Passo 1 - Descrição verbal do sistema, procurando evidenciar as interfaces entre os subsistemas tanto a nível de informação como de material;
- Passo 2 - Montar e analisar a estrutura organizacional da empresa;
- Passo 3 - Montar um diagrama de blocos especificando o fluxo de informação, de materiais e as principais funções associadas;
- Passo 4 - Fazer um arranjo multicamadas dos principais níveis do sistema, evidenciando os horizontes de tempo de cada nível e as principais funções a eles associadas;
- Passo 5 - Fazer um arranjo hierárquico multiníveis evidenciando os vetores de intervenção e informação entre os níveis;
- Passo 6 - Montar uma matriz de relacionamentos, mostrando a troca de informações entre níveis e entre elementos do mesmo nível.

Cabe salientar que os passos 4, 5 e 6 podem ser exclusivos, dependendo do tamanho do sistema, podendo-se fazer a opção entre estes três passos que melhor represente o sistema. Para o caso de sistemas de grande porte, estes passos podem ser complementares.

2.3 - FLUXO DE INFORMAÇÃO ENTRE NÍVEIS

Para se estabelecer os fluxos de informações entre os níveis de uma dada hierarquia, é necessário que se definam as tarefas dos níveis e as funções que geram intervenções nos níveis inferiores, bem como as funções que geram informações para os níveis superiores.

A estrutura aqui usada é composta basicamente por 5 níveis; Gestão, Planejamento, Coordenação, Supervisão e Controle Direto (figura 2.8).

Um detalhamento das tarefas associadas a cada nível hierárquico, bem como as funções de intervenção e de informação e os conjuntos de informações trocados entre os níveis, são apresentados a seguir [GOMIDE, 1986] :

Tarefas do Nível de Gestão

Neste nível, tem-se acesso a qualquer nível de controle da hierarquia e ao mundo externo, de forma a obter informações para tomada de decisão. As

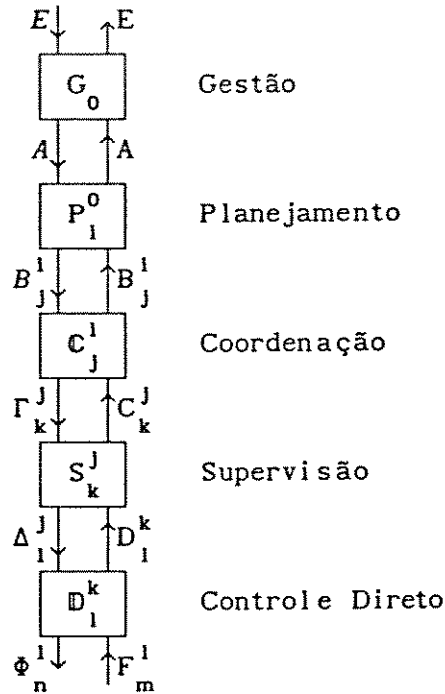


Fig. 2.8 - Arranjo em camada.

tarefas associadas a este nível são:

- 1 - Manter interfaces, fornecer informações sobre o estado da planta, da companhia e da produção de acordo com o necessário para:
 - a - Gerenciamento da planta e da companhia,
 - b - Pessoal administrativo (compras, vendas, contabilidade);
- 2 - Fornecer informações para decisões estratégicas da companhia;
- 3 - Estabelecer a comunicação com os níveis inferiores da hierarquia e com o mundo externo, de forma a obter informações para tomada de decisão;
- 4 - Realizar diagnósticos.

Para a execução das tarefas do nível de gestão associa-se a este nível um sistema funcional do tipo [MESAROVIC, 1970]:

$$G_0 : A \times E \rightarrow A \quad (2.1)$$

$$G'_0 : A \times E \rightarrow E \quad (2.2)$$

onde A representa o conjunto de informações do nível inferior, E o conjunto de intervenções do meio externo, A o conjunto de intervenções para o nível inferior e E o conjunto de informações para o meio externo. Além disso, é

assumido que estes conjuntos podem ser particionados nos seus componentes, na seguinte forma:

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_l\} \tag{2.3}$$

$$A = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_l\} \tag{2.4}$$

$$E = \{\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n\} \tag{2.5}$$

$$E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\} \tag{2.6}$$

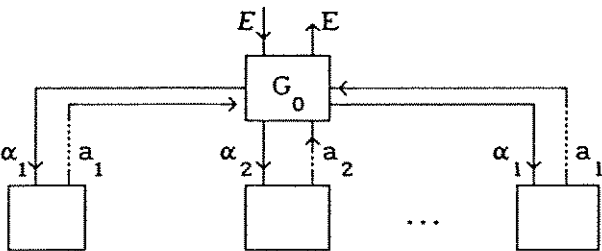


Fig. 2.9 - Estrutura hierárquica do nível de gestão.

Intervenções	Informações
ϵ 1 - Pedido de clientes 2 - Política de produção governamental 3 - Política de investimentos de recursos externos	e 1 - Preços de produtos 2 - Capacidade de produção global 3 - Plano de expansão global
α 1 - Plano de produção de produtos 2 - Plano de investimentos por área 3 - Prazos de entrega de pedidos	a 1 - Capacidade de produção do período 2 - Nível de qualidade dos produtos 3 - Custo de produção global

Tabela 2.1 - Fluxo de informação no nível de gestão.

Para simplificar a representação, na figura 2.9, as funções de intervenção e de informação estão representadas por G_0 . As principais funções de intervenção G_0 são :

- 1 - Decidir estratégias da companhia;
- 2 - Estabelecer tipos de produtos.

As principais funções de informação G'_0 são :

- 1 - Informar estado da planta, produção e companhia;
- 2 - Fazer diagnósticos.

Os fluxos de informações entre o meio externo e o nível de planejamento são apresentados na tabela 2.1.

Tarefas do Nível de Planejamento

Neste nível, o plano de produção básico e a coordenação de todas as atividades de produção incluindo aquelas relacionadas com o gerenciamento operacional, são estabelecidos como tarefas iniciais. O planejamento deve provocar o uso eficiente dos recursos, minimizar custos, maximizar produção e qualidade dos produtos, minimizar os atrasos no atendimento dos pedidos, etc. As tarefas de armazenamento, estocagem e retirada de materiais e produtos devem ser gerenciadas de forma a evitar atrasos indesejáveis. Tarefas adicionais deste nível incluem a comunicação com os níveis superiores e inferiores, o fornecimento de serviços para as interfaces homem/máquina e a realização de diagnósticos no próprio nível e nos níveis superiores e inferiores. As tarefas associadas a este nível são :

- 1 - Coletar, processar, armazenar e gerenciar dados sobre :
 - a - Uso e disponibilidade de matéria-prima e estoques, fornecendo dados para aquisição de matéria prima e insumos;
 - b - Consumo global de energia;
 - c - Matérias primas e insumos (globais) em processamento, bem como estoques de produtos acabados;
 - d - Controle de qualidade;
- 2 - Estabelecer o plano de produção básico;
- 3 - Modificar o plano de produção, para todas as áreas, de forma a incluir novos pedidos, levando em consideração os limites (energia, capacidade de produção das áreas, etc) e fornecer subsídios para a reprogramação da produção;
- 4 - Modificar o plano de produção sempre que uma interrupção ou perturbação na produção ocorra, afetando várias unidades de áreas diferentes e fornecer subsídios para a reprogramação da produção;
- 5 - Determinar os níveis ótimos dos estoques dos bens em cada ponto de estocagem, quando for necessária a existência de estoques (a partir de um compromisso, por exemplo, entre os custos de capital e custos

de operação);

- 6 - Planejar, projetar ou definir o produto, o processo e as necessidades de fabricação;
- 7 - Estabelecer as estratégias e procedimentos de gerenciamento operacional.

Para a execução das tarefas do nível de planejamento associa-se a este nível um sistema funcional do tipo :

$$P_1^0 : \alpha_1 \times b_j^1 \rightarrow \beta_j^1 \quad (2.7)$$

$$P_1'^0 : \alpha_1 \times b_j^1 \rightarrow a_1 \quad (2.8)$$

onde b_j^1 é um subconjunto do conjunto de informação B_j^1 do nível inferior, α_1 é um subconjunto do conjunto de intervenção A do nível superior, a_1 é um subconjunto do conjunto de informação A para o nível superior e β_j^1 é um subconjunto do conjunto de intervenção B_j^1 para o nível inferior (figura 2.10).

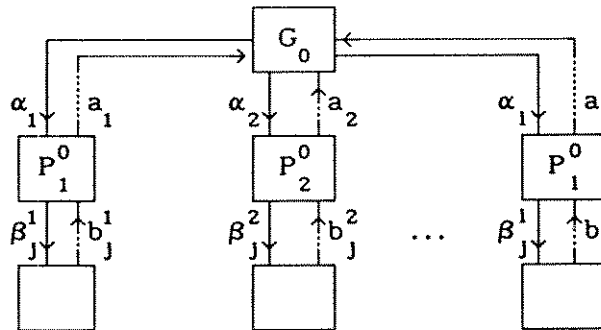


Fig. 2.10 - Estrutura hierárquica do nível de planejamento.

Assim, os conjuntos podem ser representados por :

$$B_j^1 = \{\beta_j^1, \beta_j^2, \dots, \beta_j^1\} \quad (2.9)$$

$$B_j^1 = \{b_j^1, b_j^2, \dots, b_j^1\} \quad (2.10)$$

As funções de intervenção P_1^0 são :

- 1 - Estabelecer estratégias e procedimentos de gerenciamento operacional;
- 2 - Planejar, projetar ou definir o produto, o processo e as necessidades de fabricação;

- 3 - Determinar o nível ótimo de estoques;
- 4 - Estabelecer o plano de produção básico (scheduling);
- 5 - Modificar o plano de produção em função de restrições.

As funções de informação P_1^0 são :

- 1 - Gerenciar consumo de energia, matérias primas, insumos;
- 2 - Controlar nível de estoques;
- 3 - Controlar nível de produção (quantidade, tempos);
- 4 - Controlar qualidades dos produtos.

Os fluxos de informações entre o nível de planejamento e o nível de gestão são apresentados na tabela 2.1. Os fluxos de informações entre o nível de planejamento e o nível de coordenação são apresentados na tabela 2.2.

Intervenções	Informações
β' 1 - Plano de produção básico para um ano, distribuído mês a mês, por exemplo 2 - Níveis de estoques ótimos de produtos acabados e semi-acabados 3 - Estratégias e procedimentos de gerenciamento operacional 4 - Plano de produção básico reformulado em função de eventos internos e externos	b' 1 - Disponibilidade de matéria prima, estoques 2 - Consumo de energia 3 - Controle de qualidade 4 - Nível de produção

Tabela 2.2 - Fluxo de informação no nível de planejamento

Tarefas do Nível de Coordenação

A tarefa mais importante deste nível é a geração de programas de produção reais para a operação local. O plano de produção gerado pelo nível superior tem que ser adaptado ao estado dos subsistemas (equipamentos, máquinas, processos, etc).

Por outro lado, a alocação eficiente dos recursos locais e a possibilidade de responder dinamicamente, em "tempo real", a problemas de produção pode otimizar o desempenho (minimizar custos, maximizar produção, qualidade, etc). Uma base de dados que contenha informação atualizada sobre a produção, máquinas, equipamentos ou processos fornece a informação necessária para uma

possível reprogramação da produção. As tarefas associadas a este nível são :

- 1 - Aquisição de dados e gerenciamento de uma base de dados de produção, estoques, de utilização (consumo e rendimento, por exemplo), de materiais, insumos e de energia;
- 2 - Aquisição de dados para estudos e análises de engenharia e de processos;
- 3 - Coletar e manter uma base de dados de práticas operacionais para os subsistemas associados ao nível de coordenação;
- 4 - Preparação e emissão de relatórios de produção;
- 5 - Estabelecer o programa de produção imediato para os subsistemas (áreas por exemplo), incluindo as necessidades de transporte, limitações operacionais, manutenção preventiva, capacidade de produção dos equipamentos;
- 6 - Realizar a otimização local para a área, de forma a validar ou fornecer dados para uma adaptação do plano de produção estabelecido pelo nível superior;
- 7 - Gerenciar a alocação de pessoal (operadores, supervisores) nas diversas funções de produção;
- 8 - Realizar diagnósticos;
- 9 - Manter a comunicação entre os níveis inferiores e superiores da hierarquia e fornecer serviços de interface homem/máquina

Para a execução das tarefas do nível de coordenação associa-se a este nível um sistema funcional do tipo :

$$C_j^1 : \beta_j^1 \times c_k^J \rightarrow \gamma_k^J \quad (2.11)$$

$$C_j'^1 : \beta_j^1 \times c_k^J \rightarrow b_j^1 \quad (2.12)$$

onde γ_k^J é um subconjunto do conjunto de intervenção Γ_k^J para o nível inferior, c_k^J é um subconjunto do conjunto de informação C_k^J do nível inferior, β_j^1 é um subconjunto do conjunto de intervenção B_j^1 do nível superior, b_j^1 é um subconjunto do conjunto B_j^1 de informação do nível inferior (figura 2.11). Assim, os conjuntos podem ser representados por :

$$\Gamma_k^J = \{\gamma_k^1, \gamma_k^2, \dots, \gamma_k^J\} \quad (2.13)$$

$$B_j^1 = \{b_j^1, b_j^2, \dots, b_j^J\} \quad (2.14)$$

$$B_j^1 = \{\beta_j^1, \beta_j^2, \dots, \beta_j^J\} \quad (2.15)$$

$$C_k^J = \{c_k^1, c_k^2, \dots, c_k^J\} \quad (2.16)$$

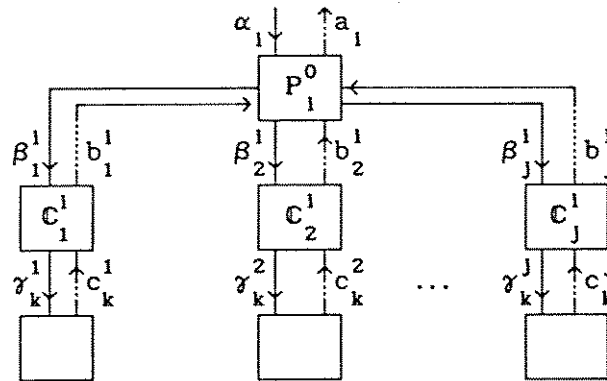


Fig. 2.11 - Estrutura hierárquica do nível de coordenação.

As funções de intervenção C_J^1 são :

- 1 - Alocar programação de produção por área em função de restrições;
- 2 - Otimizar plano de produção por área;
- 3 - Alocar pessoal;
- 4 - Analisar resultados do processo (rendimentos, consumos, etc).

As funções de informação C_J^1 são :

- 1 - Gerenciar consumo de energia, matérias primas, insumos por área;
- 2 - Controlar nível de estoques por área;
- 3 - Controlar qualidade dos produtos da área;
- 4 - Controlar nível de produção da área;
- 5 - Registrar práticas operacionais utilizadas.

Os fluxos de informações entre o nível de coordenação e o nível de planejamento são apresentados na tabela 2.2. Os fluxos entre o nível de coordenação e o nível de supervisão são apresentados na tabela 2.3.

Tarefas do Nível de Supervisão

A função básica deste nível é a de controlar um conjunto de unidades que definem uma área ou sub-área de uma planta, como por exemplo, uma célula de manufatura composta de máquinas-ferramenta diferentes, equipamentos de transportes e de manuseio, um grupo de máquinas operatrizes, um conjunto de equipamentos tais como colunas de destilação, trocadores de calor, ou mesmo um grupo de controladores de juntas de um robô. Emergências que ocorrem neste ou

Intervenções	Informações
γ^j	c^j
1 - Programa de produção por área	1 - Nível de produção por área
2 - Programa de produção otimizado	2 - Estoques, rendimentos, consumos de materiais e energia
3 - Práticas operacionais ou alterações	3 - Dados do processo

Tabela 2.3 - Fluxo de informação no nível de coordenação.

no nível inferior devem iniciar ações corretivas para manter a segurança do homem, segurança e operacionalidade dos equipamentos e o programa de produção.

A aquisição de dados sobre a qualidade dos produtos bem como operações que assegurem a qualidade são funções executadas neste nível.

As tarefas associadas a este nível são :

- 1 - Coletar, processar e manter bases de dados de produção, matérias-primas, consumo de energia, níveis de estoque de todas as unidades sob seu controle;
- 2 - Otimizar localmente a operação das unidades sob seu controle dentro dos limites estabelecidos pelo programa de produção. Estabelecer os procedimentos e práticas operacionais relacionadas com os equipamentos ou processos;
- 3 - Fornecer serviços para as interfaces homem/máquina envolvidas;
- 4 - Manter comunicação com os níveis superiores e inferiores;
- 5 - Responder a qualquer condição de emergência que exista na área da planta sob seu domínio;
- 6 - Realizar diagnóstico nos elementos do próprio nível e do nível inferior e atualizar os sistemas que estejam em "stand-by".

Para a execução das tarefas do nível de supervisão, associa-se a este nível um sistema funcional do tipo :

$$S_k^j : \gamma_k^j \times d_l^k \rightarrow \delta_l^k \quad (2.17)$$

$$S_k'^j : \gamma_k^j \times d_l^k \rightarrow c_k^j \quad (2.18)$$

onde γ_k^j é um subconjunto do conjunto de intervenção Γ_k^j do nível superior, c_k^j é

um subconjunto do conjunto de informação C_k^J para o nível superior, δ_1^k é um subconjunto do conjunto de intervenção Δ_1^k para o nível inferior, d_1^k é um subconjunto do conjunto de informação D_1^k do nível inferior (figura 2.12).

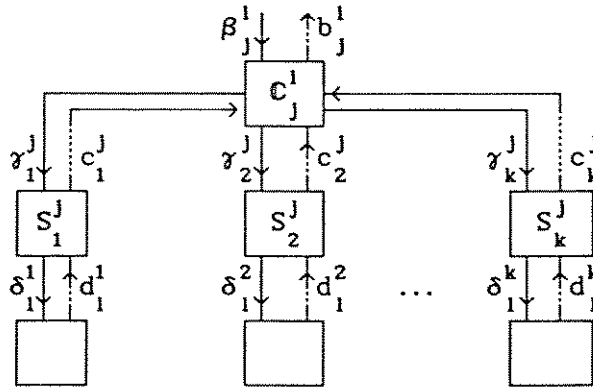


Fig. 2.12 - Estrutura hierárquica do nível de supervisão.

Assim, os conjuntos podem ser representados por :

$$\Gamma_k^J = \{\gamma_1^J, \gamma_2^J, \dots, \gamma_k^J\} \quad (2.19)$$

$$C_k^J = \{c_1^J, c_2^J, \dots, c_k^J\} \quad (2.20)$$

$$\Delta_1^k = \{\delta_1^1, \delta_1^2, \dots, \delta_1^k\} \quad (2.21)$$

$$D_1^k = \{d_1^1, d_1^2, \dots, d_1^k\} \quad (2.22)$$

As funções de intervenção S_k^J são :

- 1 - Otimizar localmente a operação das unidades, sujeito às restrições do programa de produção;
- 2 - Estabelecer procedimentos e práticas operacionais de processos e equipamentos;
- 3 - Responder a emergência;
- 4 - Atualizar sistemas em "stand-by".

As funções de informação S_k^J são :

- 1 - Controlar nível de produção das unidades;
- 2 - Controlar nível de estoque das unidades;
- 3 - Controlar consumo (materiais, energia) das unidades;
- 4 - Controlar qualidade de produtos.

Os fluxos de informações entre o nível de supervisão e coordenação são

apresentados na tabela 2.3. Os fluxos entre o nível de supervisão e controle direto são apresentados na tabela 2.4.

Intervenções	Informações
δ 1 - Programa de produção otimizado para a unidade 2 - Prática operacional por equipamento ou processo 3 - Acionamento de emergência por unidades	d 1 - Consumo por unidades 2 - Produção por unidade

Tabela 2.4 - Fluxo de informação no nível de supervisão.

Tarefas do Nível de Controle Direto

O nível de controle direto é responsável pelo controle operacional da planta, onde uma grande variedade de equipamentos, por exemplo, para manuseio de materiais, máquinas-ferramenta, linhas de montagem, trocadores de calor, tanques de reação, conversores, laminadores, motores, colunas de destilação, são controlados diretamente por controladores lógicos programáveis, comandos numéricos, controladores digitais universais ou dedicados e computadores, auxiliados por algoritmos de processamento de sinais e de controle digital.

As tarefas associadas a este nível são :

- 1 - Interfaces com os dispositivos diretamente conectados à planta (sensores, atuadores, condicionadores de sinais);
- 2 - Aquisição de dados, monitoração, anunciação de alarmes;
- 3 - Cálculos das correções (controle) a serem enviadas aos atuadores;
- 4 - Cálculos de sinais e informações de controle complexos;
- 5 - Processar, armazenar e fornecer dados aos operadores;
- 6 - Coletar informações sobre a produção da unidade, o uso de matérias primas, insumos, energia e transmitir ao nível de supervisão;
- 7 - Detetar e responder a qualquer condição de emergência que exista na unidade;
- 8 - Realizar auto-diagnóstico;
- 9 - Atualizar sistemas que estejam em "stand-by".

Para a execução das tarefas do nível de controle direto associa-se a este nível um sistema funcional do tipo :

$$\mathbb{D}_1^k : \delta_1^k \times f_n^1 \rightarrow \phi_n^1 \quad (2.23)$$

$$\mathbb{D}_1'^k : \delta_1^k \times f_n^1 \rightarrow d_1^k \quad (2.24)$$

onde δ_1^k é um subconjunto do conjunto de intervenção Δ_1^k do nível superior, d_1^k é um subconjunto do conjunto de informação D_1^k para o nível superior, ϕ_n^1 é um subconjunto do conjunto intervenção Φ_n^1 para a planta, f_n^1 é um subconjunto do conjunto de informação F_n^1 da planta (figura 2.13).

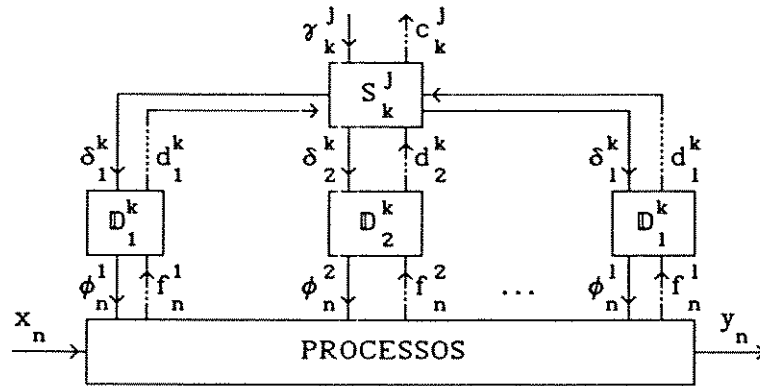


Fig. 2.13 - Estrutura hierárquica do nível de controle direto.

Assim, os conjuntos podem ser representados por :

$$\Phi_n^1 = \{\phi_n^1, \phi_n^2, \dots, \phi_n^l\} \quad (2.25)$$

$$F_n^1 = \{f_n^1, f_n^2, \dots, f_n^l\} \quad (2.26)$$

$$\Delta_1^k = \{\delta_1^k, \delta_2^k, \dots, \delta_l^k\} \quad (2.27)$$

$$D_1^k = \{d_1^k, d_2^k, \dots, d_l^k\} \quad (2.28)$$

As funções de intervenção $\mathbb{D}_1^k$ são :

- 1 - Calcular as correções (controle);
- 2 - Calcular informações e sinais de controle complexo;
- 3 - Fornecer dados aos operadores;
- 4 - Responder a condições de emergência;
- 5 - Atualizar sistemas em "stand-by".

As funções de informação $\mathbb{D}_1'^k$ são :

- 1 - Adquirir e monitorar dados;

- 2 - Coletar consumo de materiais, insumos, energia;
- 3 - Coletar dados sobre quantidade de produtos obtidos;
- 4 - Coletar dados sobre qualidade de produtos.

Os fluxos de informações entre o nível de controle direto e de supervisão são apresentados na tabela 2.4. Os fluxos entre o nível de controle direto e a planta são apresentados na tabela 2.5.

Intervenções	Informações
ϕ 1 - "Set Points" 2 - Acionamentos de emergência por equipamentos 3 - Informações para controle complexos	f 1 - Sinais de equipamentos 2 - Sinais dos processos

Tabela 2.5 - Fluxo de informação no nível de controle direto.

2.4 - RESUMO

As tarefas de um sistema integrado foram estabelecidas a partir de um modelo hierárquico funcional, cuja principal característica é a conjunção das tarefas de aquisição de dados, de controle digital e de supervisão com as tarefas de planejamento, programa de produção, gerenciamento e gestão de planta.

Procurou-se mostrar um procedimento que possibilite abordar um sistema complexo dentro do contexto em que o sistema atua, delineando os subsistemas e identificando a maioria das interfaces destes, antes de uma modelagem mais detalhada de como os vários subsistemas funcionam.

A seguir estabeleceram-se os fluxos de informação entre os níveis de uma dada hierarquia, bem como as tarefas e funções de cada nível, evidenciando as funções de intervenção e informação.

Uma vez definidos, de forma genérica, os subsistemas e os fluxos de informações entre os níveis e as funções de cada nível para um sistema produtivo, no próximo capítulo é feita uma descrição verbal de uma usina siderúrgica integrada e dos modelos matemáticos que representam o subsistema para estudo de caso.

C A P Í T U L O 3

CONTROLE HIERÁRQUICO EM PROCESSOS SIDERÚRGICOS

3.1 - INTRODUÇÃO

O propósito deste capítulo é descrever um sistema integrado de grande porte, visando situar dentro deste contexto os subsistemas que foram objeto de um arranjo hierárquico.

Para a elaboração hierárquica devem ser definidas as funções objetivo de cada subsistema obtidas a partir dos modelos matemáticos que determinam as cargas e produtos de cada subsistema.

Durante a descrição dos modelos matemáticos são estabelecidas algumas considerações de caráter metalúrgico com o objetivo de aproximar os modelos utilizados um pouco mais da realidade. Porém outras considerações são feitas com objetivo simplificador para as manipulações algébricas necessárias à formalização do sistema.

3.2 - DESCRIÇÃO DO PROCESSO

Será considerado, como um exemplo, uma usina integrada de produção de aço.

Uma usina siderúrgica é considerada uma usina integrada quando incorpora todas as fases da produção de aço, desde o manuseio e o preparo das matérias primas até o acabamento final (figura 3.1).

O processo produtivo de uma usina siderúrgica integrada pode ser considerado como decomposto em três setores básicos :

- 1 - Redução, que abrange o conjunto de unidades necessárias para a produção de gusa;
- 2 - Refino (ou metalurgia primária), que abrange o conjunto de unidades necessárias para a produção de aço na forma de placas : Aciação e Laminação Primária;
- 3 - Laminação, que abrange o conjunto de unidades necessárias para a transformação mecânica do aço visando dar forma de acordo com sua aplicação : Laminação de Chapas Grossas, Laminação de Tiras.

A seguir é feita uma descrição sucinta do processo produtivo para cada unidade.

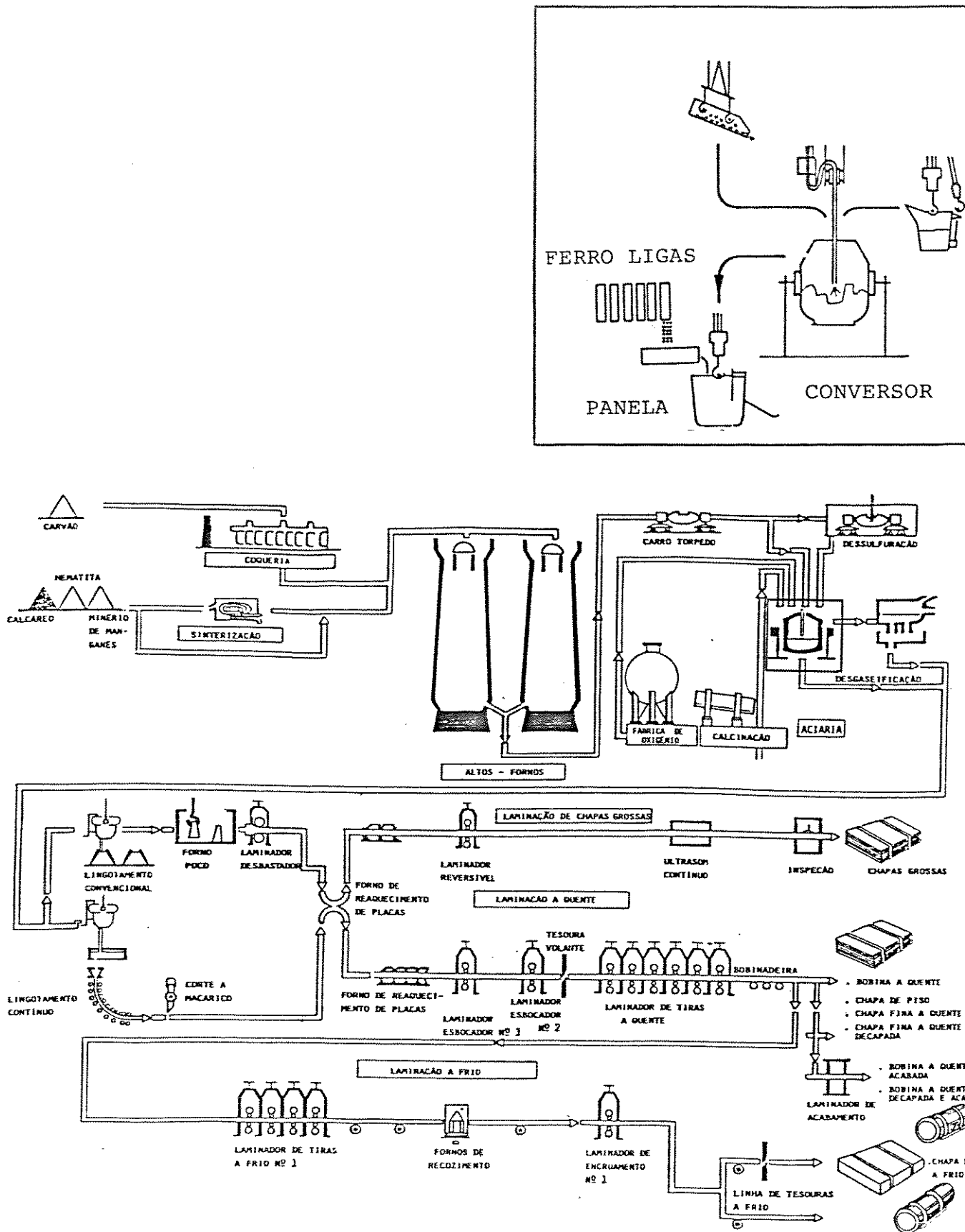


Fig 3.1 - Fluxograma simplificado de uma usina siderúrgica integrada

Coqueria

Um dos materiais mais importantes no processo siderúrgico é o coque obtido na coqueria, sendo que uma condição essencial para a operação desta unidade é o constante suprimento de carvão.

O carvão mineral utilizado, normalmente, em sua grande parte é proveniente do exterior (Polônia, Canadá, etc), sendo que o restante vem Santa Catarina. Os carvões são normalmente transportados por via marítima e/ou ferroviária, sendo que após a chegada na usina, são estocados no pátio de carvões, aguardando o momento para serem enfiados nas baterias de fornos de coqueificação.

Do processo de coqueificação resulta uma fração sólida (o coque) e uma fração gasosa (gás de coqueria - COG). Este gás é em parte processado nas usinas de carboquímicos, obtendo-se uma série de subprodutos tais como, gás de coqueria limpo, benzol, toluol, xilol - BTX, alcatrão, etc. Enquanto o coque é usado para carga dos Altos Fornos, parte dos subprodutos é usada para consumo interno da usina (combustíveis) e parte destinada à comercialização externa.

Sinterização

O sinter, um dos componentes básicos da carga dos Altos Fornos, é obtido essencialmente a partir do minério de ferro. Os minérios de ferro são provenientes do quadrilátero ferrífero de Minas Gerais, sendo transportados por via marítima e ferroviária e estocados no pátio primário.

Do pátio primário os minérios seguem posteriormente por correias transportadoras para o pátio de mistura, onde são homogeneizados em pilhas, segundo parâmetros de qualidade, juntamente com outros materiais como calcário, areia, serpentinito e manganês.

Do pátio de mistura, a mistura é então levada para os fornos de redução, onde é feita uma pré-redução do minério obtendo-se o sinter, que é triturado até a granulometria adequada e levado para compor a carga do Alto Forno.

Alto Forno

A produção de gusa tem lugar no Alto Forno, que é carregado com minério de ferro bitolado e sinter, juntamente com o coque. As reações no Alto Forno levam à formação do gusa líquido (ferro gusa) e de escória.

O ferro gusa é vazado pelos canais de gusa até carros-torpedo, que o transportam até a dessulfuração, e posteriormente à aciaria. A escória é um

subproduto que é vendido para a indústria de cimento.

Aciaria

O aço propriamente dito é produzido na aciaria. O gusa transportado pelos carros-torpedo, depois da dessulfuração, é vazado em panelas e colocado nos conversores, carregados anteriormente com sucata de aço e ferro fundido, na proporção entre 10 a 30% da carga metálica. O processo se dá pela injeção de oxigênio e adição de escorificantes, elevando a temperatura para aproximadamente 1600 °C. O aço é vazado dos conversores, tendo conjuntamente uma correção de composição através da adição de ferro-ligas.

Caso haja necessidade de um maior grau de qualidade, o aço líquido é tratado em processos de metalurgia de panela, tais como, desgaseificação a vácuo, injeção de material pulverizado, etc.

O aço líquido pode ser solidificado de duas formas :- em lingotes, ou seja, o aço líquido é vazado em lingoteiras (moldes) com formação do lingote de aço sólido. A outra forma, é transformar o aço líquido diretamente em placas por meio do lingotamento contínuo.

Laminação Primária

No caso do tipo de aciaria que produz lingotes, estes vão ser processados de forma a se transformarem em placas. Após a solidificação completa, os lingotes são retirados das lingoteiras e colocados em fornos (forno poço) para homogeneização de temperatura, sendo então laminados (laminador desbastador) transformando-os em placas. Cada lingote gera em média 3 placas.

As placas são estocadas nos pátios de placas juntamente com as placas geradas pela aciaria com lingotamento contínuo. Nesta fase, as placas podem ter três destinos : a venda direta para algum cliente, o envio para a laminação de chapas grossas ou a laminação de tiras.

Laminação de Chapas Grossas

As placas que se destinam a este tipo de laminação são retiradas do pátio de placas e reaquecidas nos fornos de placas e em seguida processadas no laminador de chapa grossa ("plate mill"). Estas, de acordo com a especificação final desejada pelo cliente, seguem dois caminhos :- acabamento final ou acabamento paralelo (corte a gás, ultra-som, desempenadeira, esmeril). Conforme liberação do controle de qualidade, as chapas grossas são estocadas no pátio de embarque e expedidas ao cliente de acordo com o programa de

embarque.

Laminação de Tiras

As placas oriundas do pátio de placas, após passarem pelos fornos de reaquecimento de placas, são processadas no laminador de tiras a quente, que as transformam em esboços com dimensões desejadas, chamadas de tiras, sendo em seguida bobinadas em bobinadeiras, obtendo-se então a bobina a quente. Esta pode ser um produto final, sendo então embalada para embarque, ou um produto intermediário.

As bobinas a quente para processamento podem gerar as chapas a quente, chapas a frio e bobinas a frio. Para obter as chapas e bobinas a frio as bobinas a quente passam pela linha de laminação a frio. Os diversos produtos finais são estocados em pátios de embarque, aguardando o embarque para o cliente.

Além dos setores básicos de produção, existem também os setores de apoio a produção, tais como:

- 1 - Energia e Utilidades;
- 2 - Laboratórios;
- 3 - Transportes;
- 4 - Auxiliares (calcinações, recuperação de sucata).

A seguir é feita uma descrição sucinta dos setores de apoio por unidade.

1 - Energia e Utilidades

O setor de energia e utilidades pode ser subdividido em três unidades básicas :

- 1.1 - Rede de energia elétrica;
- 1.2 - Rede de combustíveis;
- 1.3 - Rede de utilidades.

1.1 - Rede de Energia Elétrica

A capacidade do sistema de energia elétrica para uma usina integrada pode girar na ordem de 150 MW. Pode-se então dividir a rede em três grupos:

- Recebimento de energia, feito através de uma subestação recebedora de alta tensão, onde é efetuada a medição da demanda de energia através da qual são taxados os consumos;
- Sistema de geração própria, feito com geradores internos da casa de

força, que utilizam outras formas de energia (vapor, óleo combustível, etc) para produzir energia elétrica. Neste caso, há uma seleção das unidades que serão alimentadas, pois normalmente a casa de força não fornece potência suficiente para toda a usina;

- Sistema de distribuição, feito através de uma rede de alta tensão suprindo várias subestações abaixadoras que permitem efetuar a alimentação dos vários setores de produção, bem como manobras de operação e manutenção.

1.2 - Rede de Combustíveis

A rede de combustíveis pode ser dividida nas seguintes unidades:

- Gases combustíveis, gerados internamente na usina como subprodutos das unidades de produção;
- Gás de coqueria, obtido durante o processo de coqueificação do carvão e distribuído para um grande número de unidades de produção, sendo os fornos de reaquecimento (laminação) os maiores consumidores;
- Gás de Alto Forno, obtido pelas reações de redução do alto forno para produção do gusa líquido. É um gás de baixo poder calorífico sendo usado nos regeneradores de Alto Forno, coqueria e casa de força;
- Gás de aciaria, obtido pela reação do carbono do gusa com o oxigênio soprado para a produção de aço. Sua utilização não é imediata, pois o processo na aciaria é por batelada, sendo então armazenado em tanques para posterior distribuição. É um gás de médio poder calorífico;
- Gás misto, resultante da mistura de alguns dos gases acima citados, visando um melhor aproveitamento dos gases de baixo poder calorífico;
- Gás liquefeito de petróleo, adquirido externamente, e usado especificamente para escarfagem;
- Alcatrão, combustível líquido obtido como subproduto na coqueria, sendo armazenado em reservatórios;
- Óleo BTE, combustível líquido usado exclusivamente como redutor em Alto Forno;
- Óleo combustível, adquirido externamente, e usado para fins de combustão, como complemento de energia gerada internamente.

1.3 - Rede de Utilidades

A rede de utilidades pode ser dividida em seis unidades:

- Água, obtida de mananciais próximos a usina, sendo de utilização geral em toda a usina;
- Vapor, produzido em caldeiras, passando por turbo sopradores ou turbo geradores antes de ser distribuído. Também a utilização é geral em toda a usina;
- Ar comprimido, produzido por vários compressores espalhados pela usina e distribuídos através de uma rede comum, procurando manter o sistema com uma pressão constante;
- Oxigênio, obtido por separação do nitrogênio, a partir da destilação do ar, nas fábricas de oxigênio, sendo armazenado em reservatórios. A aciaria é o maior consumidor, utilizando-o nos conversores durante a produção do aço. É também utilizado no Alto Forno para enriquecimento do ar soprado;
- Nitrogênio, obtido simultaneamente com o oxigênio, sendo usado como gás inerte para limpeza e testes em tubulações;
- Argônio, adquirido externamente e também obtido juntamente com o oxigênio, sendo armazenado em tanques. É usado em diversas fases do processo de produção do aço (principalmente na aciaria) para fins de homogeneização e limpeza interna do aço.

2 - Laboratórios

O setor de laboratórios é composto de diversas unidades espalhadas pela usina, coincidindo com algumas unidades de produção, e uma unidades central.

A unidade central tem como função efetuar as análises químicas e físicas das matérias primas (com exeção do minério de ferro e carvão), concentrar todos os resultados das análises (sem exceção) e distribuir alguns resultados às unidades locais que eventualmente solicitem.

Tanto as unidades locais como a central, constam de uma área de preparação de amostras, que são enviadas aos equipamentos de análise (espectrômetros de massa, raio X, etc.).

Normalmente estes equipamentos estão associados a sistemas computadorizados, formando uma rede com a unidade central que contém um computador com maior capacidades de memória de massa.

3 - Transportes

Aquí cabe salientar apenas os sistemas de transportes que possuem uma relação direta com o sistema produtivo. Dentre eles, estão :

3.1 - Sistema de transporte de minérios e sínter

3.2 - Sistema de transporte de carvão

3.3 - Sistema de transporte de gusa líquido

O sistema de transporte de minérios, sínter e carvão é composto de correias transportadoras, "stackers", "reclaimers", "stacker reclaimers", balanças e amostradores.

No recebimento, as matérias-primas são amostradas, pesadas e enviadas, através de correias transportadoras, para dois grandes pátios : pátio primário (para manganês, hematita, calcáreo) e pátio de carvão. O pátio primário conta com 5 pistas de empilhamento de acordo com as matérias primas.

A formação de pilhas (tanto de minérios como de carvão) utiliza os "stackers", enquanto que na recuperação, os "reclaimers". Estes equipamentos estão conectados aos sistemas de correias transportadoras que levam os materiais de um pátio ao outro, ou às unidades de processamento (coqueria e sinterização).

É importante salientar que toda a movimentação destes materiais deve objetivar uma otimização de estocagem e recuperação.

O terceiro sistema de transporte é composto de carros-torpedo. O gusa líquido produzido no Alto Forno é vazado em carros-torpedo e estes são então levados à aciaria (e estação de dessulfuração) utilizando locomotivas diesel.

Os carros-torpedo têm uma capacidade entre 150 a 200 tons e o tempo de permanência de gusa no interior não deve exceder a aproximadamente 8 horas. Este sistema visa a possibilitar a formação de um estoque mínimo de gusa líquido na entrada da aciaria, sujeito a restrições de tempo de permanência, carga a ser produzida, e disponibilidades de carros-torpedo.

4 - Auxiliares

O setor aquí chamado de auxiliares consta das unidades que têm uma influência indireta porém importante na produção.

A calcinação é a unidade que produz a maior quantidade de cal utilizada na usina (principalmente na aciaria). O calcáreo proveniente das minerações é colocado em um forno rotativo, onde ocorre o processo de calcinação

transformando-o em cal. A cal é, então colocada em vagões para transporte para as unidades de produção e então armazenados em silos fechados.

No forno rotativo é utilizado principalmente óleo combustível, sendo um dos pontos de maior consumo deste tipo de combustível.

A unidade de recuperação de sucata produz sucata a partir de matérias-primas, tais como escória do conversor, projeções do conversor, e escória da panela. Estes materiais são levados a uma área onde são triturados até uma granulometria adequada e a seguir é feita a separação da parte metálica do restante. A parte metálica é, então, colocada em vagões e levada para a aciaria e usada como sucata de baixo teor metálico.

Neste trabalho, adotou-se uma parte da Aciaria, o conversor e a metalurgia de panela (adição de ferro-ligas) como a área para o estudo de caso, sendo que estas duas sub-áreas estão sujeitas a um problema de tomada de decisão onde existe um coordenador que determina as intervenções para as duas sub-áreas (supervisores), baseado nas informações recebidas das mesmas e de níveis superiores. Este problema pode ser encarado como um problema de otimização multicritérios, onde os objetivos do sistema global são obter a máxima produção com o mínimo custo. Porém o mesmo problema pode ser decomposto em níveis hierárquicos, onde o objetivo do nível de coordenação é maximizar a produção e o objetivo dos níveis de supervisão é minimizar os custos de produção.

A seguir é feita uma descrição dos modelos matemáticos que compõem estas duas sub-áreas.

3.3 - MODELAGEM DO PROCESSO

O desenvolvimento dos modelos que representam os processos associados aos três subsistemas foi feito a partir de um estudo dos processos físicos relativos aos dois supervisores, para então obter o modelo de coordenação. Este modelo será detalhado a seguir.

3.3.1 - MODELO DO CONVERSOR (PROCESSO 1)

A estrutura básica do modelo do processo 1 parte do princípio de que

um certo número de matérias primas são transformadas, por ação do sopro de oxigênio, em produtos (figura 3.2). As matérias primas e os produtos são formados essencialmente por diversos componentes, elementos (como C, Si, Mn, P, S, Fe, O) e compostos (SiO_2 , CaO , FeO , etc). Por outro lado, tanto as matérias primas como os produtos têm um conteúdo térmico, traduzido pela respectiva entalpia.

Matérias Primas		Produtos
Gusa líquido Sucata Oxigênio Cal Dolomita Minério de ferro Ferro silício	$\longrightarrow$	Aço líquido Escória Gases Fumos

Fig 3.2 - Estrutura básica do processo 1 (conversor)

O modelo matemático que representa o processo 1 (conversor) é formado por um conjunto de equações algébricas, onde as equações 3.1 a 3.8 são relativas ao balanço de massa (Obs : unidade considerada Kg/ton) :

$(X_i)_j$: fração em peso do componente i no material j

$$M_g = 1000 - M_s \quad (3.1)$$

onde; M_g = massa de gusa, e M_s = massa de sucata.

$$M_f = R_f \frac{160}{112} [(X_{Fe})_g \cdot M_g + (X_{Fe})_s \cdot M_s] \quad (3.2)$$

onde; M_f = massa dos fumos, e R_f = porcentagem de ferro contido na carga metálica que sai na forma de fumos (0.7%).

$$M_c = \frac{A_1 + A_2 + A_3}{R \cdot U - V \cdot S} \quad (3.3)$$

$$A_1 = S \cdot [(X_{MgO})_m \cdot M_m - T \cdot [(X_{SiO_2})_m \cdot M_m + (X_{Si})_{fs} \cdot \frac{60}{28} \cdot M_{fs}]]$$

$$A_2 = R \cdot [B \cdot [(X_{SiO_2})_m \cdot M_m + (X_{Si})_{fs} \cdot \frac{60}{28} \cdot M_{fs}] - (X_{CaO})_m \cdot M_m]$$

$$A_3 = [R \cdot B - [T - F] \cdot S] \cdot \frac{60}{28} \cdot (X_{Si})_g \cdot M_g$$

$$R = (X_{MgO})_d - T \cdot (X_{SiO_2})_d \quad S = (X_{CaO})_d - B \cdot (X_{SiO_2})_d$$

$$V = (X_{MgO})_c - T \cdot (X_{SiO_2})_c \quad U = (X_{CaO})_c - B \cdot (X_{SiO_2})_c$$

onde; M_c = massa de cal, M_m = massa de minério de ferro, M_{fs} = massa de ferro

silício, B = basicidade (é a relação CaO/SiO_2 considerada neste trabalho = 3)
 T = relação MgO/SiO_2 (0.55), e F = relação de desgaste do revestimento refratário do conversor (nula).

$$M_d = \frac{A_4 + A_5}{S} \quad (3.4)$$

$$A_4 = B \cdot [(X_{\text{SiO}_2})_m \cdot M_m + (X_{\text{Si}})_{fs} \cdot \frac{60}{28} \cdot M_{fs}] - (X_{\text{CaO}})_m \cdot M_m$$

$$A_5 = B \cdot \frac{60}{28} \cdot (X_{\text{Si}})_g \cdot M_g - U \cdot M_c$$

onde; M_d = massa de dolomita.

$$M_e = M_{\text{SiO}_2} + M_{\text{CaO}} + M_{\text{FeO}} + M_{\text{Fe}_2\text{O}_3} + M_{\text{Al}_2\text{O}_3} + M_{\text{P}_2\text{O}_5} + M_{\text{MnO}} + M_{\text{MgO}} + M_{\text{CaS}} \quad (3.5)$$

$$M_{\text{SiO}_2} = (X_{\text{SiO}_2})_c \cdot M_c + (X_{\text{SiO}_2})_d \cdot M_d + (X_{\text{SiO}_2})_m \cdot M_m + \frac{60}{28} [(X_{\text{Si}})_{fs} \cdot M_{fs} + (X_{\text{Si}})_g \cdot M_g]$$

$$M_{\text{CaO}} = (X_{\text{CaO}})_c \cdot M_c + (X_{\text{CaO}})_d \cdot M_d + (X_{\text{CaO}})_m \cdot M_m - \frac{56}{32} [(X_{\text{S}})_s \cdot M_s + (X_{\text{S}})_g \cdot M_g - (X_{\text{S}})_a \cdot M_a]$$

$$M_{\text{FeO}} = \frac{\text{Rox}}{[1 + \text{Rox}]} \cdot \frac{72}{56} \cdot X_{\text{fet}} \cdot M_e$$

$$M_{\text{Fe}_2\text{O}_3} = \frac{1}{[1 + \text{Rox}]} \cdot \frac{160}{112} \cdot X_{\text{fet}} \cdot M_e$$

$$M_{\text{Al}_2\text{O}_3} = (X_{\text{Al}_2\text{O}_3})_c \cdot M_c + (X_{\text{Al}_2\text{O}_3})_d \cdot M_d + (X_{\text{Al}_2\text{O}_3})_m \cdot M_m$$

$$M_{\text{P}_2\text{O}_5} = (X_{\text{P}_2\text{O}_5})_m \cdot M_m + \frac{142}{62} [(X_{\text{P}})_s \cdot M_s + (X_{\text{P}})_g \cdot M_g - (X_{\text{P}})_a \cdot M_a]$$

$$M_{\text{MnO}} = (X_{\text{MnO}})_m \cdot M_m + \frac{71}{55} [(X_{\text{Mn}})_g \cdot M_g - (X_{\text{Mn}})_a \cdot M_a]$$

$$M_{\text{MgO}} = (X_{\text{MgO}})_c \cdot M_c + (X_{\text{MgO}})_d \cdot M_d + (X_{\text{MgO}})_m \cdot M_m$$

$$M_{\text{CaS}} = \frac{72}{32} [(X_{\text{S}})_s \cdot M_s + (X_{\text{S}})_g \cdot M_g - (X_{\text{S}})_a \cdot M_a]$$

$$X_{\text{fet}} = \frac{[-5.348 - 9.116 \cdot \ln[(X_c)_a]]}{100}$$

onde; M_e = massa de escória, Rox = relação de oxidação ($\text{Fe}^{+2}/\text{Fe}^{+3} = 3$), e X_{fet} = quantidade de ferro total na escória.

$$M_a = \frac{[1 - R_f] \cdot [(X_{\text{Fe}})_g \cdot M_g + (X_{\text{Fe}})_s \cdot M_s] + \text{FeI} - X_{\text{fet}} \cdot M_e}{(X_{\text{Fe}})_a} \quad (3.6)$$

$$\text{FeI} = \frac{112}{160} \cdot [(X_{\text{Fe}_2\text{O}_3})_c \cdot M_c + (X_{\text{Fe}_2\text{O}_3})_d \cdot M_d + (X_{\text{Fe}_2\text{O}_3})_m \cdot M_m] + (X_{\text{Fe}})_{fs} \cdot M_{fs}$$

onde; M_a = massa de aço.

$$M_{gs} = M_{co} + M_{co_2} \quad (3.7)$$

$$M_{co} = \frac{R_v}{[1 + R_v]} \cdot \frac{28}{44} [M_{cox} \cdot \frac{44}{12} + (X_{pf})_c \cdot M_c + (X_{pf})_d \cdot M_d]$$

$$M_{co_2} = \frac{1}{[1 + R_v]} \cdot [M_{cox} \cdot \frac{44}{12} + (X_{pf})_c \cdot M_c + (X_{pf})_d \cdot M_d]$$

$$M_{cox} = (X_c)_s \cdot M_s + (X_c)_g \cdot M_g - (X_c)_a \cdot M_a$$

onde; M_{gs} = massa dos gases, R_v = relação volumétrica dos gases ($CO/CO_2 = 9$). Foi considerado que a perda ao fogo (pf) da cal e dolomita são liberados na forma de CO_2 .

$$M_o = \frac{1}{\eta_o} \cdot [M_{ox} + \frac{32}{16} \cdot (X_o)_a \cdot M_a] \quad (3.8)$$

$$M_{ox} = M_{oc} + M_{os} + M_{op} + M_{of2} + M_{of3} + M_{oa} + M_{om} + M_{ofs} + M_{ocs}$$

$$M_{oc} = \frac{32}{44} \cdot [M_{co_2} - (X_{pf})_c \cdot M_c + (X_{pf})_d \cdot M_d] + \frac{16}{28} \cdot M_{co}$$

$$M_{os} = \frac{32}{60} \cdot [M_{sio_2} - (X_{sio_2})_c \cdot M_c - (X_{sio_2})_d \cdot M_d - (X_{sio_2})_m \cdot M_m]$$

$$M_{op} = \frac{80}{142} \cdot [M_{p_2o_5} - (X_{p_2o_5})_m \cdot M_m]$$

$$M_{of2} = \frac{16}{72} \cdot [M_{FeO} - (X_{Fe})_{fs} \cdot M_{fs}]$$

$$M_{of3} = \frac{48}{160} \cdot [M_{Fe_2O_3} + M_f - (X_{Fe_2O_3})_c \cdot M_c - (X_{Fe_2O_3})_d \cdot M_d - (X_{Fe_2O_3})_m \cdot M_m]$$

$$M_{oa} = \frac{48}{102} \cdot [M_{Al_2O_3} - (X_{Al_2O_3})_c \cdot M_c - (X_{Al_2O_3})_d \cdot M_d - (X_{Al_2O_3})_m \cdot M_m]$$

$$M_{om} = \frac{16}{71} \cdot [M_{MnO} - (X_{MnO})_m \cdot M_m]$$

$$M_{ofs} = 0.5 \cdot M_{fs}$$

$$M_{ocs} = \frac{16}{52} \cdot M_{CaS}$$

onde; M_o = massa de oxigênio, e η_o = rendimento do oxigênio soprado (0.966).

As equações 3.9 a 3.18 e as tabelas 3.1 a 3.5 são relativas ao balanço de energia do conversor. A temperatura das matérias primas, sucata (T_s), cal (T_c), dolomita (T_d), ferro silício (T_{fs}), minério de ferro (T_m), e oxigênio (T_o) foram consideradas constantes igual à 25°C.

$$H_j = M_j \cdot \sum_i [(X_i)_j \cdot h_i(T_j) + Q_i] \quad (3.9)$$

a equação 3.9 é válida para calcular a entalpia do gusa e aço líquidos, sendo que j representa o material e i o elemento químico do material j . Assim, H_g = entalpia do gusa, H_a = entalpia do aço, $h_i(T_j)$ = entalpia dos componentes

puros (tabela 3.1), e Q_i = calores de mistura.

$$H_s = M_s \cdot \sum_i [(X_i)_s \cdot h_i(T_s) + Q_i] \tag{3.10}$$

onde; H_s = entalpia da sucata, e $h_i(T_s)$ = entalpia dos componentes da sucata (tabela 3.2).

$$H_f = M_f[-1298.2 + 0.2173 \cdot T_f] \tag{3.11}$$

onde; H_f = entalpia dos fumos, e T_f = temperatura dos fumos como função da temperatura do aço (T_a), ($T_f = T_a + 10$).

Elementos i	$h_i(T_j)$	Q_i
Fe(líquido)	$-46.3 + 0.1969 \cdot T_j$	0.0
C	$-260.2 + 0.4812 \cdot T_j$	$451.33 + 0.31 \cdot (X_c)_j$
Si	$369.7 + 0.2171 \cdot T_j$	$-1246.17 + 0.8 \cdot (X_c)_j + 0.34 \cdot (X_{Si})_j$
P	$493.0 + 0.1431 \cdot T_j$	-942.73
Mn	$-34.3 + 0.2002 \cdot T_j$	0.0
S	$437.0 + 0.1401 \cdot T_j$	-983.03
O	$-111.9 + 0.2768 \cdot T_j$	-1750.07

Tabela 3.1 - Entalpia dos componentes puros e dos calores de mistura para o aço ($j = a$) e gusa ($j = g$) líquidos

Componentes i	$h_i(T_s)$	Q_i
Fe(sol)	$-44.1 + 0.148 \cdot T_s$	0.0
Fe ₃ C(sol)	$-202.0 + 2.350 \cdot T_s$	0.0
FeS(sol)	$-797.5 + 0.162 \cdot T_s$	$4.12 \cdot 10^{-4} \cdot T_s$
Fe ₃ P(sol)	$-1536.8 + 0.935 \cdot T_s$	0.0
FeSi(sol)	$-835.5 + 0.503 \cdot T_s$	0.0
Mn(sol)	$-46.19 + 0.155 \cdot T_s$	0.0

Tabela 3.2 - Entalpia dos componentes da sucata

$$H_{gs} = M_{co}[-1068.5 + 0.3043 \cdot T_{gs}] + M_{co_2}[-2284.5 + 0.3217 \cdot T_{gs}] \tag{3.12}$$

onde; H_{gs} = entalpia dos gases, e T_{gs} = temperatura dos gases como função da temperatura do aço ($T_{gs} = T_a + 10$).

$$H_o = M_o[-72.33 + 0.224 \cdot T_o + 1.56 \cdot 10^{-5} \cdot T_o^2 + \frac{1250}{T_o}] \tag{3.13}$$

onde; H_o = entalpia do oxigênio

$$H_{fs} = -85.8 \cdot M_{fs} \tag{3.14}$$

onde; H_{fs} = entalpia do ferro silício.

$$H_m = M_m \cdot \sum_i [(X_i)_m \cdot h_i(T_m)] \quad (3.15)$$

onde; H_m = entalpia do minério de ferro, e $h_i(T_m)$ = entalpia dos componentes do minério de ferro (tabela 3.3).

$$H_j = M_j \cdot \sum_i [(X_i)_j [R_i \cdot h_i(T_j) - k_i \cdot h_{cao}(T_j)]] \quad (3.16)$$

a equação 3.16 é válida para calcular a entalpia da cal e dolomita, sendo que j representa o material e i o elemento químico do material j . Assim, H_c = entalpia da cal, H_d = entalpia da dolomita, $h_i(T_j)$ = entalpia dos componentes puros (tabela 3.4), e R_i , k_i = relação dos pesos moleculares entre óxidos e interóxidos.

Componentes i	$h_i(T_m)$
SiO ₂	-3678.0 + 0.256 · T _m
CaO	-2768.0 + 0.210 · T _m
FeO	-942.8 + 0.184 · T _m
Fe ₂ O ₃	-1294.0 + 0.214 · T _m
Al ₂ O ₃	-3996.0 + 0.261 · T _m
P ₂ O ₅	-2586.0 + 0.251 · T _m
MnO	-1347.3 + 0.169 · T _m
MgO	-3673.0 + 0.268 · T _m
S	-1862.0 + 0.210 · T _m

Tabela 3.3 - Entalpia dos componentes do minério de ferro

Componentes i	$h_i(T_j)$	R_i	k_i
SiO ₂	-3259.0 + 0.230 · T _j	172.22/60	112/60
CaO	-2768.0 + 0.210 · T _j	1	0
MgO	-3673.0 + 0.268 · T _j	1	0
Fe ₂ O ₃	-1940.8 + 0.2124 · T _j	271.86/160	112/160
Al ₂ O ₃	-3273.3 + 0.229 · T _j	270.18/102	168/102
PF	-2959.5 + 0.262 · T _j	100.09/44	56/44

Tabela 3.4 - Entalpia dos componentes da cal ($j = c$) e dolomita ($j = d$)

$$H_e = M_e \cdot \sum_i [(X_i)_e [R_i \cdot h_i(T_e) - k_i \cdot h_{cao}(T_e)]] \quad (3.17)$$

onde; H_e = entalpia da escória, T_e = temperatura da escória como função da temperatura do aço ($T_e = T_a + 20$), e $h_i(T_e)$ = entalpia dos componentes da escória (tabela 3.5).

Neste exemplo foi considerado que não há perdas de calor para o meio e portanto a variação de entalpia é apenas função dos materiais de entrada e saída, sendo $\Delta H = 0$:

$$\Delta H = [H_a + H_e + H_f + H_{gs}] - [H_s + H_g + H_o + H_c + H_d + H_m + H_{fs}] \quad (3.18)$$

Componentes i	$h_i(T_e)$	R_i	k_i
SiO ₂	$-3265.6 + 0.320 \cdot T_e$	172.22/60	112/60
CaO	$-2805.5 + 0.320 \cdot T_e$	1	0
FeO	$-904.5 + 0.2366 \cdot T_e$	1	0
Fe ₂ O ₃	$-1985.0 + 0.320 \cdot T_e$	271.86/160	112/160
Al ₂ O ₃	$-3235.1 + 0.320 \cdot T_e$	270.18/102	168/102
P ₂ O ₅	$-3224.8 + 0.320 \cdot T_e$	366.28/142	224/142
MnO	$-1464.6 + 0.320 \cdot T_e$	1	0
MgO	$-3559.0 + 0.320 \cdot T_e$	1	0
CaS	$-1628.8 + 0.320 \cdot T_e$	1	0

Tabela 3.5 - Entalpia dos componentes da escória

Os materiais da tabela 3.6 foram considerados com composição química constante, pois não apresentam variações entre corridas.

i	Min. Ferro	i ^J	Cal	Dol.	i	Sucata	FeSi
SiO ₂	4.0	SiO ₂	2.66	4.1	Fe	99.52	25
CaO	0.5	CaO	88.3	51.8	C	0.1	0
FeO	0.0	MgO	4.8	33.87	S	0.02	0
Fe ₂ O ₃	94.36	Fe ₂ O ₃	0.91	0.62	P	0.02	0
Al ₂ O ₃	0.4	Al ₂ O ₃	0.54	5.21	Si	0.0	75
P ₂ O ₅	0.04	PF	2.79	4.4	Mn	0.34	0
MnO	0.2						
MgO	0.5						
CaS	0.0						

Tabela 3.6 - Composições químicas constantes para cal, dolomita, minério de ferro, sucata e ferro silício (%).

Para a cal, dolomita e escória, fez-se a hipótese de que os compostos SiO₂, Fe₂O₃ e Al₂O₃ estão presentes na forma de interóxidos com CaO. Para a escória, além dos compostos acima, P₂O₅ também está presente na forma de interóxido.

3.3.2 - MODELO DE METALURGIA DE PANELA (PROCESSO 2)

A estrutura básica do modelo do processo 2 parte de que um certo número de matérias-primas (ferro ligas) são adicionados ao aço líquido (produto do processo 1) para obter, através de um processo de mistura, o aço

líquido com a composição química final objetivada (figura 3.3).

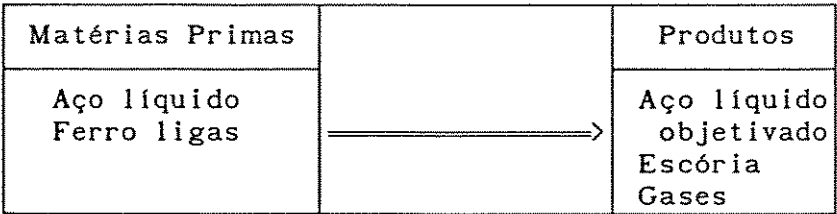


Fig 3.3 - Estrutura básica do processo 2 (metalurgia de panela)

As matérias-primas e produtos são formados por elementos químicos e compostos semelhantes ao processo 1. Porém, cabe salientar que o modelo matemático que representa o processo 2 é formado por equações de balanço de massa (equação 3.19), não sendo considerado o balanço térmico deste processo.

$$\text{Ferro liga: } f_l = \frac{\Delta E \cdot 10}{\eta_E^{f_l} \cdot P_E^{f_l}} \quad (3.19)$$

onde : $\eta_E^{f_l}$ é o rendimento do elemento químico E no ferro-liga f_l (tabela 3.7)
 $P_E^{f_l}$ é a porcentagem do elemento químico E no ferro-liga f_l (tabela 3.7)
 $\Delta E = E_f - E_a$; é a variação entre o teor do elemento no aço líquido E_a e o teor do elemento no aço líquido objetivado E_f .

Para alguns elementos que possuem um alto grau de oxidação, foi considerada a sua função como agente desoxidante do aço líquido. Nestes casos, a partir de considerações termodinâmicas, calcula-se a quantidade de elemento oxidado, corrigindo o valor E_f :

$$E_f = E_f + E_{ox} \quad (3.20)$$

$$\text{onde : } E_{ox} = \frac{PME \cdot Y \cdot N_{ExOy}}{PMO \cdot \sum_1 [Y \cdot N_{ExOy}]_1} (O_a - O_f) \quad (3.21)$$

N_{ExOy} ; fração molar dos óxidos na escória
 O_a ; teor de oxigênio no aço líquido (%)
 O_f ; teor de oxigênio no aço líquido objetivado = 0.001%
 PME ; peso molecular do elemento E

Os elementos considerados como desoxidantes neste trabalho são : Alumínio, Silício, Manganês, Ferro e Carbono. Para estes elementos, a fração molar é calculada conforme apresentado na tabela 3.8 [CAMPOS, 1980].

Concentração/Rendimento								
Material	Moinha	FeSiMn	FeMn _{ac}	Alum.	FeSi	FeMn _{mc}	FeMn _{bc}	Grafit
Elemento								
C	85/50	2/85	6.8/85			1.8/85	.2/85	95/85
Mn		66/87	75/87			77/87	75/87	
Si		17/90	.5/90		75/90	1/90	2.5/100	
P		.25/100	.25/100		.05/100	.25/100	.2/100	
Al				99/50				
S		.25/100	.25/100			.25/100		

Concentração/Rendimento					
Material	FeNb	Cobre	FeCr _{bc}	FeV	FeNi
Elemento					
C					.01/100
Mn	2/100				
Si				1/100	.02/100
P					.04/100
Al	1/100			2/100	
Nb	65/85				
Cu		99/100			
Cr			55/90		
V				52/85	
Ni					19/100

Tabela 3.7 - Porcentagens e rendimentos dos ferro-ligas

Componente i	NEioy
Fe	$N_{FeO} = O_f \cdot 10^{\left[\frac{6317}{T} - 2.7344\right]}$
Si	$N_{SiO_2} = Si \cdot O_f^2 \cdot e^{\left[\frac{71465}{T} - 27.68\right]}$
Mn	$N_{MnO} = Mn \cdot O_f \cdot 10^{\left[\frac{12907}{T} - 5.6459\right]}$
Al	$N_{Al_2O_3} = Al^2 \cdot O_f^3 \cdot 10^{\left[\frac{73000}{T} - 28.85\right]}$

Tabela 3.8 - Fração molar dos componentes da escória da panela

Para o carbono, foi considerada uma relação empírica em função do oxigênio no aço líquido do tipo (equação 3.22) :

$$C_{ox} = \frac{(O_a - O_f)}{10}$$

(3.22)

Para a obtenção da massa dos compostos oxidados utiliza-se a equação 3.23 para os elementos considerados como desoxidantes :

$$M_{ExOy} = \frac{PM_{ExOy} \cdot E_{ox}}{PME} \cdot \frac{10}{10} \quad (3.23)$$

Cabe salientar que as %Si, %Mn e %Al, quando para cálculo da massa de compostos oxidados, é obtida a partir da equação 3.19 :

$$E = \sum_{j=1}^{nfl} \frac{fl(j) \cdot \eta_E^{fl} \cdot P_E^{fl}}{10} + E_a \quad (3.24)$$

onde fl são os ferro-ligas utilizados na adição na panela.

3.4 - RESUMO

Descreveu-se uma usina integrada de produção de chapas planas de aço procurando evidenciar o sistema produtivo e o sistema de apoio, bem como as interdependências dos subsistemas que os compõem. Nota-se que uma usina siderúrgica é composta de diversas unidades de produção (fábricas) possuindo um alto grau de acoplamento tanto a nível de fluxo de materiais como de informação. Porém, cada fábrica possui metas de produção e custos individuais, coordenados através de um plano de produção global.

Os modelos matemáticos apresentados representam uma parte da unidade de produção de aço (Aciaria), onde para o processo 1 (conversor) o objetivo do modelo estático é determinar as quantidades de matérias-primas a serem carregadas e em decorrência do balanço de massa e energia são obtidos os pesos dos produtos das reações. Para o processo 2 (metalurgia de panela) é apresentado um modelo de balanço de massa sem considerar o efeito térmico nesta fase do processo, com o objetivo de determinar os pesos dos ferro-ligas a serem adicionados e pesos dos produtos das reações.

Os dois processos são do tipo batelada não linear, com parâmetros distribuídos. Assim sendo, adotaram-se neste trabalho modelos matemáticos compostos por um conjunto de equações algébricas [HEIDPRIEM, 1983].

A partir dos modelos matemáticos apresentados e da descrição dos processos, no capítulo seguinte é feito um arranjo hierárquico definindo as funções de coordenação e supervisão, e a estrutura funcional do sistema de suporte à decisão.

C A P Í T U L O 4

IMPLEMENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 - INTRODUÇÃO

O objetivo deste capítulo é definir o problema na forma de um arranjo hierárquico e descrever a maneira em que foram implementados os três subsistemas, tanto em relação ao sistema de equações que descrevem os subsistemas, como a estrutura geral computacional.

A seguir são apresentados os resultados computacionais para um único tipo de aço com a seguinte faixa de composição química objetivada final :

$$\begin{aligned}0.10 &\leq C \leq 0.14 \\0.90 &\leq Mn \leq 1.10 \\0.20 &\leq Si \leq 0.30 \\P &\leq 0.030 \\S &\leq 0.030 \\0.030 &\leq Al \leq 0.150\end{aligned}$$

Este tipo de aço é dito acalmado a silício e alumínio, normalmente empregado para fins estruturais, sendo esta faixa de composição química muito usual em diversas siderúrgicas.

Para este aço, são feitos três exemplos variando os fatores de ponderação da função objetivo do coordenador e a seguir é feita uma análise dos resultados obtidos tanto em relação a alguns aspectos matemáticos como em relação aos aspectos de conformidade com a evolução dos processos reais.

4.2 - DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

No capítulo 2 foi ressaltado em alguns diagramas um subsistema que será aqui detalhado, enquanto que no capítulo 3 foram apresentados os modelos que descrevem o subsistema objeto de estudo de caso.

A configuração funcional deste subsistema é dada por um coordenador e dois supervisores (conversor e metalurgia de panela), distribuídos hierarquicamente de forma que os supervisores operam independentemente entre si, com o coordenador resolvendo as possíveis situações de conflito e determinando alguns pontos de operação.

As funções associadas a cada módulo são :

Coordenador : 1 - Minimizar as perdas do subsistema global, definindo a composição química e temperatura de entrada e saída do supervisor 1 e a entrada do supervisor 2;

2 - Minimizar o custo total do subsistema, decidindo a mistura de materiais que apresentou o menor custo para os dois supervisores. Isto é efetuado através de um sistema de suporte de decisão onde é feita a escolha da melhor mistura.

Supervisor 1 : - Minimizar o custo de adição no conversor sujeito ao balanço de massa e energia (Modelo Estático). São levadas em consideração algumas restrições operacionais, limitando o uso de alguns materiais.

Supervisor 2 : - Minimizar o custo de adição de ferro-ligas na panela sujeito ao balanço de massa. Neste caso, o balanço de energia é desprezado, pois não apresenta influência prática. São levadas em consideração algumas restrições operacionais.

A configuração hierárquica do subsistema é apresentada na figura 4.1,

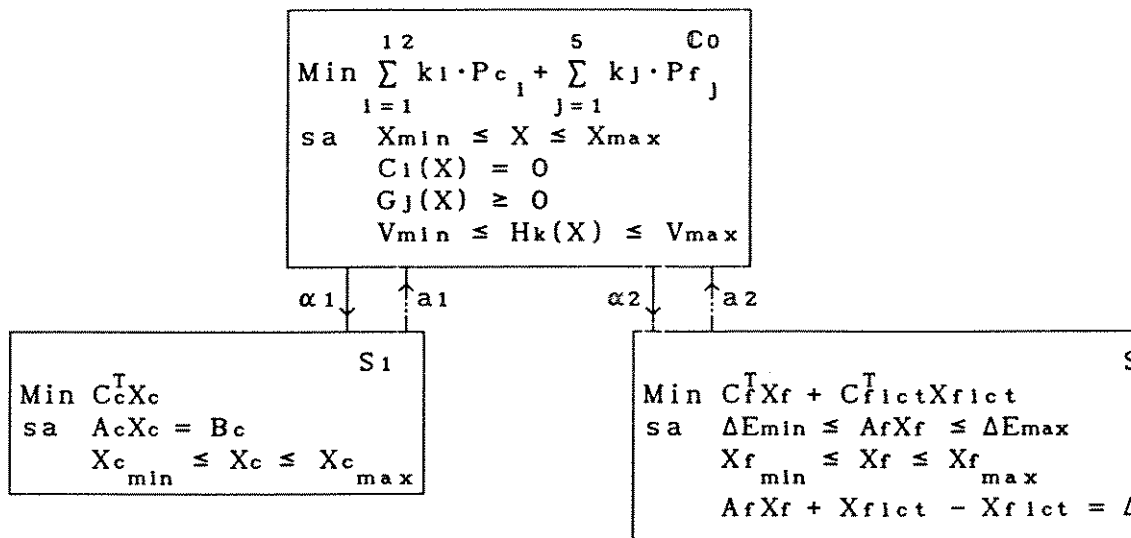


Fig 4.1 - Configuração do subsistema proposto

onde :

$$\sum_{i=1}^{12} k_i \cdot P_{c_i} ; \text{ perdas no conversor}$$

$$\sum_{j=1}^5 k_j \cdot P_{f_j} ; \text{ perdas na panela}$$

$C_i(X)$; balanço de composição química

$G_j(X)$ e $H_k(X)$; restrições operacionais

X ; vetor das variáveis de intervenção (elementos químicos e temperaturas

C_c ; vetor de custo dos materiais do supervisor 1 (conversor)

X_c ; vetor dos materiais do supervisor 1

$A_c X_c = B_c$; balanço de massa e energia do supervisor 1

C_f ; vetor de custo dos materiais do supervisor 2 (panela)

C_{fict} ; vetor de custo dos ferro ligas fictícios

X_f ; vetor de materiais do supervisor 2

X_{fict} ; vetor dos ferro ligas fictícios

A_f ; matriz de composição química multiplicada pelo rendimento do supervisor 2

$\Delta E.$; vetor de variação entre a composição química do aço líquido com os valores mínimos e máximos de composição

ΔE ; vetor de variação entre a composição química do aço líquido com o objetivado

4.3 - DESCRIÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO

Os modelos apresentados na seção 3.3 descrevem os processos físicos envolvidos, porém, não representam uma forma adequada para uma implementação real de problemas de otimização. Assim sendo, é necessário uma manipulação algébrica destes modelos para colocá-los na forma adequada, tendo sido considerado desnecessária a apresentação de todas as etapas desta manipulação.

Para a solução dos sistemas supervisores utilizou-se um algoritmo de programação linear via o método Simplex revisado, e na solução do sistema coordenador utilizou-se o método do Lagrangeano Aumentado [NAG, 1978].

4.3.1 - SUPERVISOR 1 (Conversor)

O modelo básico do supervisor do conversor consiste de uma função de custo de adição e um conjunto de restrições. Assim temos :

$$\text{Min } C_c^T X_c \quad (4.1)$$

onde C_c é o vetor custo dos materiais do conversor e X_c é o vetor de adição.

As restrições são decorrentes das equações de balanço de massa e energia do processo a partir de manipulações algébricas (equações 3.1 a 3.18 e tabelas 3.1 a 3.6), ou seja :

$$A_c X_c = B_c \quad (4.2)$$

onde :

$$A_c = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & mcg & 0 & -1 & 0 & 0.1233 & 0.6604 & 0 \\ 0 & mdg & 0 & -2.0334 & -1 & 0.2911 & 12.2061 & 0 \\ mas & mag & 0 & mac & mad & maf & mai & -maa \\ mos & mog & -0.966 & -moc & -mod & -mof & moi & -moa \\ hs & hg & -0.001976 & hc & hd & hf & hi & -ha \end{bmatrix}$$

$$B_c^T = [1000 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

sendo que os elementos m.. e h. são funções das variáveis de decisão X (composições químicas e temperaturas do gusa e aço líquidos).

À essas restrições são acrescentadas restrições por material :

$$X_{c_{\min}} \leq X_c \leq X_{c_{\max}} \quad (4.3)$$

onde $X_{c_{\min}}$ e $X_{c_{\max}}$ são quantidades mínimas e máximas de um dado material respectivamente.

Assim, o sistema supervisor do conversor passa a ser representado pela função objetivo 4.1 sujeita às restrições 4.2 e 4.3.

4.3.2 - SUPERVISOR 2 (Metalurgia de Panela)

O modelo básico do supervisor da metalurgia de panela consiste de uma função de custo de adição e um conjunto de restrições. Assim temos :

$$\text{Min } C_f^T X_f \quad (4.4)$$

onde C_f é o vetor custo dos ferro-ligas e X_f é o vetor de adição na panela.

As restrições são decorrentes das equações de balanço de massa (equações 3.19 a 3.24, e tabelas 3.7 e 3.8), ou seja :

$$\Delta E_{\min} \leq A_f X_f \leq \Delta E_{\max} \quad (4.5)$$

onde $\Delta E_{\min}$ e $\Delta E_{\max}$ são os vetores incremento desejado por elemento e Ar é a porcentagem, do elemento químico disponível no ferro-liga (já incluído o rendimento esperado no processo).

A essas restrições foram acrescentadas restrições por ferro-ligas :

$$X_{r_{\min}} \leq X_r \leq X_{r_{\max}} \quad (4.6)$$

onde $X_{r_{\min}}$ e $X_{r_{\max}}$ são quantidades mínimas e máximas de um dado ferro-liga respectivamente.

Esta forma de equacionamento não é satisfatória pois resulta em soluções de composição química final tendendo para os extremos das faixas admissíveis por elemento químico. O interessante é colocar os valores de composição química final o mais próximo possível em torno do valor objetivado (figura 4.2).

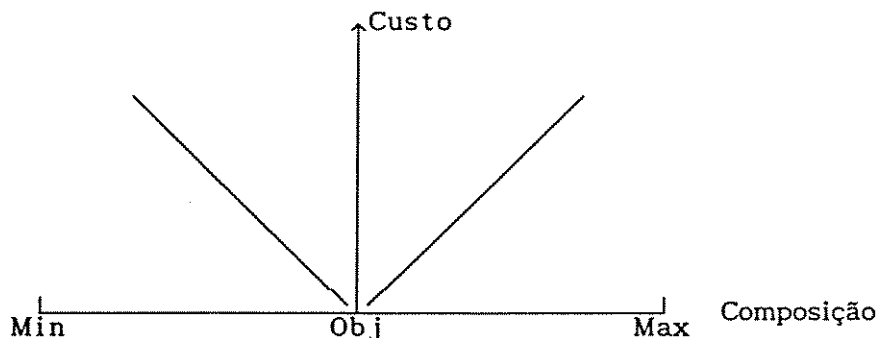


Fig 4.2 - Representação da função objetivo do supervisor da panela

Para solucionar isto, deve-se acrescentar uma restrição de igualdade com os valores objetivados :

$$ArX_r = \Delta E \quad (4.7)$$

porém, este tipo de restrição pode inviabilizar o sistema. Assim sendo, é somado e subtraído à restrição 4.7 um vetor de ferro-ligas "fictícios", para evitar que o sistema não apresente solução, ou seja :

$$ArX_r + X_{fict} - X_{fict} = \Delta E \quad (4.8)$$

O conjunto de restrições torna-se factível porque os ferro-ligas fictícios contém apenas um dos elementos químicos objetivados no aço. Colocando o custo dos ferro-ligas fictícios uma ordem de grandeza acima dos ferro-ligas normais, o sistema tende a resolver a equação de igualdade utilizando o mínimo possível destes ferro-ligas fictícios (figura 4.3).

Com isso a função objetivo passa a ser :

$$\text{Min } C_f^T X_f + C_{fict}^T X_{fict} \quad (4.9)$$

onde C_{fict} e X_{fict} são os vetores custo e adição, respectivamente, dos ferro-ligas fictícios. Porém estes custos a adições não são apresentados, uma vez

$$\begin{matrix} & \text{ferro ligas} \\ & \begin{bmatrix} A_f & 0 & 0 \\ A_f & 0 & 0 \\ I & 0 & 0 \\ I & 0 & 0 \\ A_f & I & -I \end{bmatrix} \\ \text{elementos} & \cdot \begin{bmatrix} X_f \\ X_{fict} \\ X_{fict} \end{bmatrix} \end{matrix} \geq \begin{bmatrix} \Delta E_{min} \\ \Delta E_{max} \\ X_{min} \\ X_{max} \\ Obj \end{bmatrix}$$

Fig.4.3 - Conjunto de restrições sistema de equações de ferro-ligas

que decorrem apenas de um artifício utilizado.

Desta maneira, o sistema supervisor da panela pode ser representado pela função objetivo 4.9 sujeito às restrições 4.5, 4.6, 4.8.

4.3.3 - COORDENADOR

Conforme apresentado na seção 3.3, a estrutura básica dos modelos dos processos parte de que há um certo número de produtos gerados durante a conversão das matérias-primas. Entre os produtos, existem aqueles que são os objetivos dos processos (aço líquido de fim de sopro e aço líquido final), e aqueles que podem ser chamados de subprodutos de reação. Estes subprodutos são essenciais para que as reações ocorram, porém procura-se sempre minimizar a formação destes, pois normalmente implicam em perdas no rendimento dos processos.

Assim, o modelo básico do nível de coordenação visa a minimização destas perdas, ou seja :

$$\text{Min } \left\{ \sum_{i=1}^{12} k_i \cdot P_{c_i} + \sum_{j=1}^5 k_j \cdot P_{r_j} \right\} \quad (4.10)$$

onde : $P_{c_i} = f[X, X_c]$; função de perdas no conversor
 $P_{r_j} = f[X, X_f]$; função de perdas na panela
 k_i, k_j ; fatores de ponderação.

A função de perdas no conversor (P_{c_i}) é, basicamente, a somatória dos compostos formados na escória (equação 3.5), dos gases gerados (equação 3.7), e dos fumos (equação 3.2).

A função de perdas na panela (P_{r_j}) é a somatória dos produtos de desoxidação do aço durante a adição dos ferro-ligas (equações 3.24 , 3.22 e tabela 3.8).

As restrições são decorrentes de parâmetros operacionais, ou seja :

$$X_{\min} \leq X \leq X_{\max} \quad (4.11)$$

$$C_i(X) = 0 \quad ; \quad i = 1,2 \quad (4.12)$$

$$G_j(X) \geq 0 \quad ; \quad j = 1,2 \quad (4.13)$$

$$V_{\min} \leq H_k(X) \leq V_{\max} \quad ; \quad k = 1,2 \quad (4.14)$$

onde :

$$C_1(X) = \sum_{i=1}^6 (X_i)_g \quad ; \quad C_2(X) = \sum_{j=1}^7 (X_j)_a \quad : \text{ são o fechamento composição}$$

química do gusa e do aço;

$$G_1(X) = 6.28 \cdot 10^{-3} + 2.54 \cdot 10^{-5} \cdot T_g - 0.34 \cdot (X_{Si})_g - (X_C)_g \quad ;$$

$G_2(X) = (X_S)_g - (X_S)_a$: são limitações para alguns elementos químicos;

$$H_1(X) = \frac{(X_{Mn})_a}{(X_C)_a} \quad \text{para } V_{\min} = 1 \text{ e } V_{\max} = 2,5 \quad ;$$

$$H_2(X) = \log(X_{Mn})_a + 2.91 \log(X_O)_a + 1.83 \log(X_C)_a - \log T_a$$

para $V_{\min} = -10.5192$ e $V_{\max} = -9.435$: são limitações para o controle do grau de oxidação do processo.

O sistema coordenador fica representado pela função objetivo 4.10 sujeita às restrições 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14.

4.3.4 - SISTEMA DE SUPORTE À DECISÃO

A implementação dos três subsistemas é suportada por módulos que têm por objetivo auxiliar na tomada de decisão (figura 4.4), onde as linhas cheias representam o fluxo direto de acesso às rotinas de sistema, e as linhas pontilhadas representam os retornos em função de uma dada decisão.

Estes módulos podem ser colocados em dois grandes grupos : Módulo de

definições de parâmetros e restrições e Módulo de cálculos.

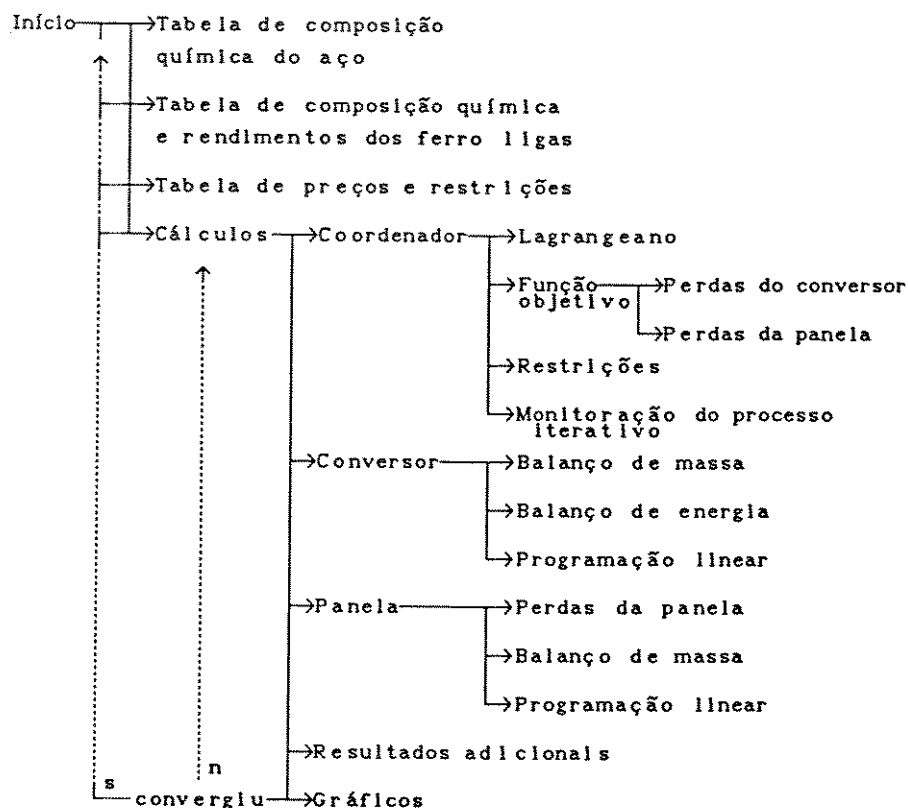


Fig 4.4 - Estrutura hierárquica do programa

O módulo de definições de parâmetros e restrições têm por objetivo auxiliar o usuário do sistema a escolher as condições de operação. Este módulo é composto por :

- 1 - Tabela de composição química do aço, onde são definidos o tipo de aço, com a respectiva faixa de composição química final que se deseja produzir e os valores mínimos, máximos e objetivados por elemento químico. Além disso, são definidos alguns parâmetros operacionais, tais como temperatura de fim de sopro objetivada, temperatura final na panela, etc;
- 2 - Tabela de composição química e rendimentos dos ferro-ligas, onde são definidos os valores de porcentagem e rendimentos de cada elemento químico por ferro-liga (tabela 3.7);
- 3 - Tabela de preços e restrições, onde são definidos os preços de cada material (para os dois supervisores), e algumas restrições de adição (Tabela 4.1). Além disso, também são definidos neste sub-módulo os valores dos coeficientes de ponderação da função objetivo do coordenador.

O módulo de cálculos têm por objetivo resolver os sistema de equações que representam os objetivos de cada subsistema da hierarquia. Este módulo é composto por :

- 1 - Coordenador, onde são montadas a função objetivo e restrições do nível de coordenação;
- 2 - Conversor, onde são montadas as equações de balanço de massa e energia do supervisor do conversor e a função objetivo deste supervisor, bem como as restrições operacionais;
- 3 - Panela, onde são montadas as equações de desoxidação e correções da composição química objetivada, o balanço de massa e a função objetivo do supervisor da panela, bem como as respectivas restrições operacionais;
- 4 - Resultados adicionais, onde são apresentados os valores das variáveis do processo, tanto físico como matemático, que não sejam variáveis de coordenação, porém auxiliam na avaliação dos resultados, principalmente de caráter metalúrgico;
- 5 - Gráficos, onde são apresentados o comportamento do sistema com relação aos valores das funções objetivos e o processo iterativo.

4.4 - RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISE

Para ilustrar os aspectos operacionais e metodológicos propostos neste trabalho, alguns exemplos são apresentados a seguir.

Deve-se ressaltar que para todos os exemplos as restrições 4.3 e 4.6 bem como os vetores de custo dos materiais C_c e C_r são fixados conforme tabela 4.1. As variáveis de coordenação são inicializadas com os seguintes valores :

$$\begin{array}{ll}
 (X_c)_g = 4.3 & (X_c)_a = 0.08 \\
 (X_{Si})_g = 0.6 & (X_{Si})_a = 0.0 \\
 (X_{Mn})_g = 0.7 & (X_{Mn})_a = 0.15 \\
 (X_P)_g = 0.08 & (X_P)_a = 0.02 \\
 (X_S)_g = 0.025 & (X_S)_a = 0.02 \\
 & (X_O)_a = 0.05 \\
 (X_T)_g = 1325 & (X_T)_a = 1620
 \end{array}$$

Estes valores da tabela 4.1, bem como os de inicialização correspondem a valores típicos para este tipo de processo.

P A N E L A				C O N V E R S O R			
	Preço [US\$/Kg]	[Kg]			Preço [US\$/Kg]	[Kg/to]	
		min	max			min	max
Moinha	$0.542 \cdot 10^{-2}$	0	200	Sucata	$0.90248 \cdot 10^{-2}$	100	4
FeSiMn	$0.6981 \cdot 10^{-1}$	0	2000	Gusa	$0.13533 \cdot 10^{-1}$	0	
FeMn _{ac}	$0.6228 \cdot 10^{-1}$	0	2000	Oxigênio	$0.71048 \cdot 10^{-2}$	0	
Aluminio	0.1787	0	300	Cal	$0.62083 \cdot 10^{-2}$	15	
FeSi	$0.8284 \cdot 10^{-1}$	0	300	Dolomita	$0.61393 \cdot 10^{-2}$	4	
FeMn _{mc}	$0.8856 \cdot 10^{-1}$	0	1000	Min.Ferro	$0.25192 \cdot 10^{-2}$	0	3
FeMn _{bc}	0.100	0	2000	FeSi	$0.64666 \cdot 10^{-1}$	0	2
Grafite	$0.474 \cdot 10^{-1}$	0	1000	Aço	$-0.15071 \cdot 10^{-1}$	0	
FeNb	0.2457	0	9999				
Cobre	1.500	0	9999				
FeCr _{bc}	0.1077	0	9999				
FeV	1.001	0	9999				
FeNi	0.1395	0	9999				

Tabela 4.1 - Custos e restrições de adição de materiais para os supervisores 1 e 2

Os exemplos são agrupados em 3 casos, onde os valores dos fatores de ponderação (equação 4.10) são fixados como :

1º Caso : $k_i = 0.01$; $k_j = 1.0$

2º Caso : $k_i = k_j = 1.0$

3º Caso : $k_i = 1.0$; $k_j = 100$

A escolha destes valores para ponderação se deve ao fato de que algumas variáveis de coordenação (ex : C, Si), e as variáveis de informação dos supervisores (ex : pesos das perdas) possuem uma relação em torno de 10^2 .

O número de iterações para a convergência de cada supervisor e do coordenador foi diferente para cada caso e diferentes entre si. Assim sendo, adotou-se um limite de 6 iterações para todas as unidades do sistema.

O critério usado para o teste de convergência foi de 10^{-5} para todos os casos e níveis, cabendo salientar que este teste foi feito sobre o valor da função objetivo de cada unidade e de forma interativa com o usuário através de um ambiente de tomada de decisão (figura 4.4).

Os recursos computacionais utilizados foram um VAX 785/VMS, sendo os algoritmos implementados em FORTRAN. O tempo de CPU para cada nível de supervisão ficou entre 1 a 2 segundos, enquanto que para o nível de coordenação ficou entre 4 a 8 segundos. Porém, o sistema de suporte à decisão é muito dependente da avaliação pelo usuário, das variáveis de decisão, sendo que neste caso o tempo total para se atingir uma solução de equilíbrio, ou satis-

fatória, variava em torno de 15 minutos.

As tabelas 4.2, 4.3, 4.4 apresentam os resultados computacionais de coordenação para os casos 1, 2 e 3 respectivamente. Pode-se notar que as va-

Gusa							
iter	C	Mn	Si	P	S	T	
0	4.3	0.7	0.6	0.08	0.025	1325.0	
1	3.5	0.5	0.2	0.04	0.021	1395.9	
2	3.5	0.5	0.2	0.04	0.021	1395.9	
3	3.5	0.5	0.2	0.04	0.024	1395.9	
4	3.5	0.5	0.2	0.04	0.024	1395.9	
5	3.5	0.5	0.2	0.04	0.024	1395.9	
6	3.5	0.5	0.2	0.04	0.024	1395.9	

Aço							
iter	C	Mn	Si	P	S	O	T
0	0.080	0.150	0.0	0.020	0.020	0.05	1620.0
1	0.122	0.297	0.0	0.024	0.022	0.03	1590.0
2	0.122	0.30	0.0	0.024	0.022	0.03	1590.0
3	0.122	0.30	0.0	0.024	0.024	0.03	1590.0
4	0.122	0.30	0.0	0.024	0.024	0.03	1590.0
5	0.122	0.30	0.0	0.024	0.024	0.03	1590.0
6	0.122	0.30	0.0	0.024	0.024	0.03	1590.0

Perdas			
iter	Conversor	Panela	Total
0	163.6196	1.8026	165.4222
1	110.8386	1.0143	111.8529
2	110.7722	1.0129	111.7851
3	110.7646	1.0129	111.7775
4	110.7690	1.0129	111.7819
5	110.7690	1.0129	111.7818
6	110.7691	1.0129	111.7819

Tabela 4.2 - Solução do coordenador para o primeiro caso

riáveis de coordenação nos três casos apresentaram o mesmo resultado durante o processo iterativo, a menos da variável temperatura do gusa (T_g) que no caso 1 apresentou um valor mais elevado (1395.9) em relação aos outros dois casos (1291.9 e 1287.6 para casos 2 e 3 respectivamente), e ao valor inicial

(1325.0).

Gusa						
iter	C	Mn	Si	P	S	T
0	4.3	0.7	0.6	0.08	0.025	1325.0
1	3.501	0.5	0.276	0.04	0.05	1282.3
2	3.5	0.5	0.2	0.04	0.022	1291.9
3	3.5	0.5	0.2	0.04	0.024	1291.9
4	3.5	0.5	0.2	0.04	0.024	1291.9
5	3.5	0.5	0.2	0.04	0.024	1291.9
6	3.5	0.5	0.2	0.04	0.024	1291.9

Aço							
iter	C	Mn	Si	P	S	O	T
0	0.080	0.150	0.0	0.020	0.020	0.05	1620.0
1	0.116	0.274	0.0	0.024	0.022	0.031	1590.0
2	0.121	0.297	0.0	0.024	0.022	0.03	1590.7
3	0.122	0.30	0.0	0.024	0.024	0.03	1590.0
4	0.122	0.30	0.0	0.024	0.024	0.03	1590.0
5	0.122	0.30	0.0	0.024	0.024	0.03	1590.0
6	0.122	0.30	0.0	0.024	0.024	0.03	1590.0

Perdas			
iter	Conversor	Panela	Total
0	163.6196	1.8026	165.4222
1	117.0957	1.0362	118.1319
2	115.2812	1.0140	116.2952
3	115.1586	1.0129	116.1715
4	115.1627	1.0129	116.1756
5	115.1628	1.0129	116.1757
6	115.1625	1.0129	116.1754

Tabela 4.3 - Solução do coordenador para o segundo caso

As variáveis de coordenação relativas ao gusa (composição química) diminuíram em relação aos valores iniciais dados e, por outro lado, as variáveis relativas ao aço líquido (a menos do oxigênio e temperatura), aumentaram em relação ao valor inicial. Este comportamento é compatível com as características deste processo, pois as perdas (P_{c_1}) do supervisor do conversor são diretamente proporcionais à diferença da composição química do gusa e aço

(equação 4.15) :

$$P_c \propto X_g - X_a \quad (4.15)$$

e para o supervisor da panela, as perdas (Pr_i) são calculadas por :

$$Pr \propto \frac{X_a \cdot e^{1/T}}{\sum_i (X_a \cdot e^{1/T})_i} \quad (4.16)$$

Gusa							
iter	C	Mn	Si	P	S	T	
0	4.3	0.7	0.6	0.08	0.025	1325.0	
1	3.5	0.5	0.2	0.04	0.024	1287.6	
2	3.5	0.5	0.2	0.04	0.024	1287.6	
3	3.5	0.5	0.2	0.04	0.024	1287.6	
4	3.5	0.5	0.2	0.04	0.024	1287.6	

Aço							
iter	C	Mn	Si	P	S	O	T
0	0.080	0.150	0.0	0.020	0.020	0.05	1620.0
1	0.124	0.30	0.0	0.024	0.024	0.03	1590.0
2	0.122	0.30	0.0	0.024	0.024	0.03	1590.0
3	0.122	0.30	0.0	0.024	0.024	0.03	1590.0
4	0.122	0.30	0.0	0.024	0.024	0.03	1590.0

Perdas			
iter	Conversor	Panela	Total
0	163.6196	1.8026	165.4222
1	115.2830	1.0129	116.2960
2	115.3559	1.0129	116.3689
3	115.3567	1.0129	116.3696
4	115.3567	1.0129	116.3696

Tabela 4.4 - Solução do coordenador para o terceiro caso

Assim sendo, a perda total do sistema apresentou uma diminuição de 32.43%, 29.77%, e 29.65% para os casos 1, 2 e 3 respectivamente (figura 4.5)
Pelas tabelas 4.2, 4.3 e 4.4 pode-se notar que as perdas do conversor

(P_{c_i}) tiveram uma diminuição de 32.30%, 29.62% e 29.50%, enquanto que as perdas da panela (P_{r_j}) foram de 43.81% para os três casos.

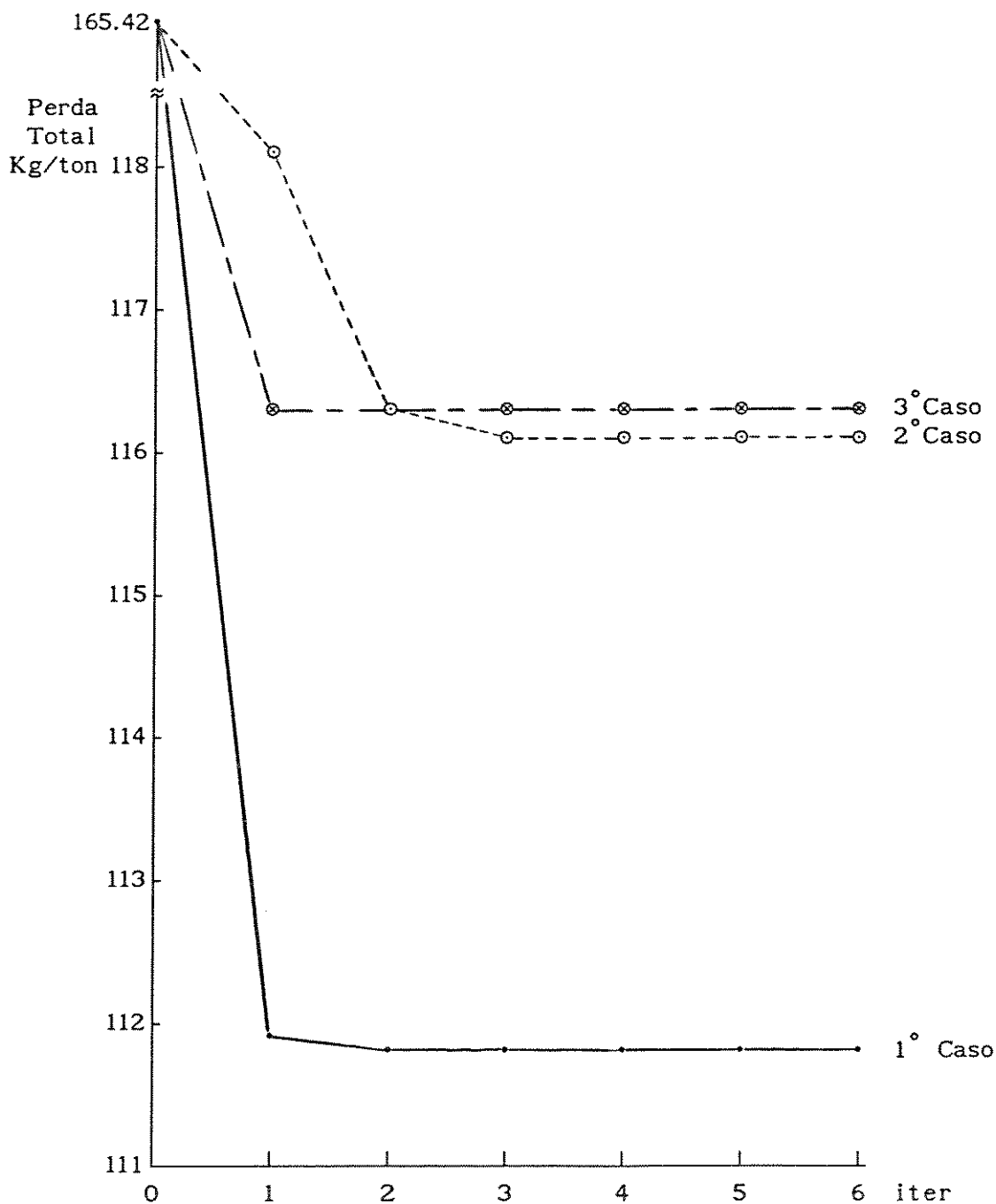


Fig 4.5 - Perdas totais do sistema em Kg/ton (Coordenador)

As tabelas 4.5, 4.6 e 4.7 apresentam os resultados computacionais do nível de supervisão, novamente para os casos 1, 2 e 3. Pode-se notar que, para o supervisor do conversor o custo diminuiu em 25.17% para o caso 1 e 0.28%

para o caso 2, e aumentou em 0.79% para o caso 3 (figura 4.6), enquanto que para o supervisor da panela o custo aumentou em 12.08% para os três casos (figura 4.7).

Conversor				
iter	Sucata Cal	Gusa Dolomita	Oxigênio FeSi	Aço Custo
0	246.8082	753.1918	63.2899	939.2375
	29.3754	13.7188	0.0000	-1.0187
1	200.5872	799.4128	48.7085	958.8383
	15.00	7.0062	0.9439	-1.2787
2	200.3795	799.6205	48.6923	958.8222
	15.00	7.0062	0.9433	-1.2777
3	200.3856	799.6144	48.6874	959.3266
	15.00	7.0062	0.9434	-1.2853
4	200.4019	799.5981	48.6885	958.6467
	15.00	7.0062	0.9434	-1.2752
5	200.4022	799.5978	48.6885	958.6428
	15.00	7.0062	0.9434	-1.2751
6	200.4019	799.5981	48.6885	958.6433
	15.00	7.0062	0.9434	-1.2751

Panela						
iter	Moinha	FeSiMn	FeMnbc	FeSi	Al	Custo
0	0.4004	15.6810	0.0000	0.4519	1.3318	1.3723
1	0.0	2.3722	8.9179	3.00	1.3232	1.5427
2	0.0	2.3784	8.8695	3.00	1.3225	1.5381
3	0.0	2.3784	8.8695	3.00	1.3225	1.5381

Tabela 4.5 Solução de supervisão para o primeiro caso

Para o supervisor do conversor, a composição química e a temperatura do gusa líquido são responsáveis pela quase totalidade do aporte térmico ao processo correspondente a este supervisor, e definem a proporção de sucata admissível para a obtenção, principalmente, do teor de carbono e temperatura do aço visado no final de sopro.

Assim sendo, pode-se constatar que nos três casos, a temperatura do aço diminuiu, enquanto que a temperatura do gusa para o caso 1 aumentou em relação ao valor inicial, e para os casos 2 e 3 diminuíram, implicando uma queda na adição de sucata de 18.80% para o caso 1, e de 38% para os outros

dois casos.

O cálculo do peso de cal a ser adicionado é realizado tendo-se em conta as necessidades do processo em termos de desfosforação e dessulfuração que definem o teor de silício do gusa, uma vez que a basicidade foi fixada em 3. O peso de cal é dado pela equação 3.3, onde pode-se notar que a adição

Conversor				
iter	Sucata Cal	Gusa Dolomita	Oxigênio FeSi	Aço Custo
0	246.8082	753.1918	63.2899	939.2375
	29.3754	13.7188	0.00	-1.0187
1	149.3108	850.6892	52.3799	954.8057
	15.2796	7.1358	0.00	-1.0192
2	152.5989	847.4011	51.3500	957.5022
	15.00	7.0061	0.8161	-1.0017
3	152.7807	847.2193	51.3046	957.4254
	15.00	7.0061	0.8166	-1.0317
4	152.7981	847.2019	51.3045	956.7562
	15.00	7.0061	0.8166	-1.0217
5	152.7975	847.2025	51.3055	956.7596
	15.00	7.0061	0.8166	-1.0217
6	152.7994	847.2006	51.3053	847.2066
	15.00	7.0061	0.8166	-1.0216

Panela						
iter	Moinha	FeSiMn	FeMnbc	FeSi	Al	Custo
0	0.4004	15.6810	0.0000	0.4519	1.3318	1.3723
1	0.0	2.8712	8.8398	2.8924	1.3372	1.5633
2	0.0	2.3770	8.9207	3.00	1.3225	1.5422
3	0.0	2.3784	8.8695	3.00	1.3225	1.5381
4	0.0	2.3784	8.8695	3.00	1.3225	1.5381

Tabela 4.6 - Solução de supervisão para o segundo caso

deste material é diretamente proporcional à %Si do gusa. Por outro lado, nas tabelas 4.2, 4.3 e 4.4 nota-se que a diferença entre os teores de fósforo e enxofre do gusa e aço líquido fim de sopro diminuíram, e consequentemente diminuem as necessidades dos processos de desfosforação e dessulfuração.

A adição de dolomita é calculada para a obtenção de um certo teor de MgO na escória final, de forma a minimizar o ataque no revestimento refratário do conversor, que no caso em estudo foi fixado como nulo. Assim, a adição de

dolomita é calculada com base na equação 3.4, onde pode-se notar que também neste caso a adição deste material é diretamente proporcional à %Si do gusa.

Conversor				
iter	Sucata Cal	Gusa Dolomita	Oxigênio FeSi	Aço Custo
0	246.8082	753.1918	63.2899	939.2375
	29.3754	13.7188	0.0000	-1.0187
1	150.4194	849.5806	51.3982	957.0773
	15.00	7.0061	0.8103	-1.0155
2	150.6815	849.3185	51.4208	957.9688
	15.00	7.0061	0.8110	-1.0149
3	150.6966	849.3034	51.4209	957.6787
	15.00	7.0061	0.8110	-1.0106
4	150.6963	849.3037	51.4209	957.6825
	15.00	7.0061	0.8110	-1.0106

Panela						
iter	Moinha	FeSiMn	FeMnbc	FeSi	Al	Custo
0	0.4004	15.6810	0.0000	0.4519	1.3318	1.3723
1	0.0	2.3784	8.8695	3.00	1.3225	1.5381
2	0.0	2.3784	8.8695	3.00	1.3225	1.5381

Tabela 4.7 - Solução de supervisão para o terceiro caso

Para o supervisor da panela, a desoxidação e ajuste da composição química são as operações mais importantes neste processo. Após o período de oxidação, que é a principal característica do processo do conversor, o teor de oxigênio do aço está muito alto. A desoxidação é a operação na qual o teor de oxigênio é reduzido a níveis compatíveis com o tipo e qualidade do aço que está sendo fabricado.

Um bom controle da desoxidação começa com a escolha adequada dos desoxidantes. A determinação do tipo e quantidade dos desoxidantes a serem utilizados depende da variação entre a composição química do aço de fim de sopro e do aço objetivado, do poder desoxidante que cada elemento têm e das restrições operacionais e custos definidos para o processo, além de ser um fator preponderante no ajuste da composição do aço, influenciando diretamente sobre o rendimento dos ferro-ligas.

Para o tipo de aço definido para este estudo, determinou-se que a

desoxidação é feita com base no alumínio, carbono, manganês, silício, e ferro.

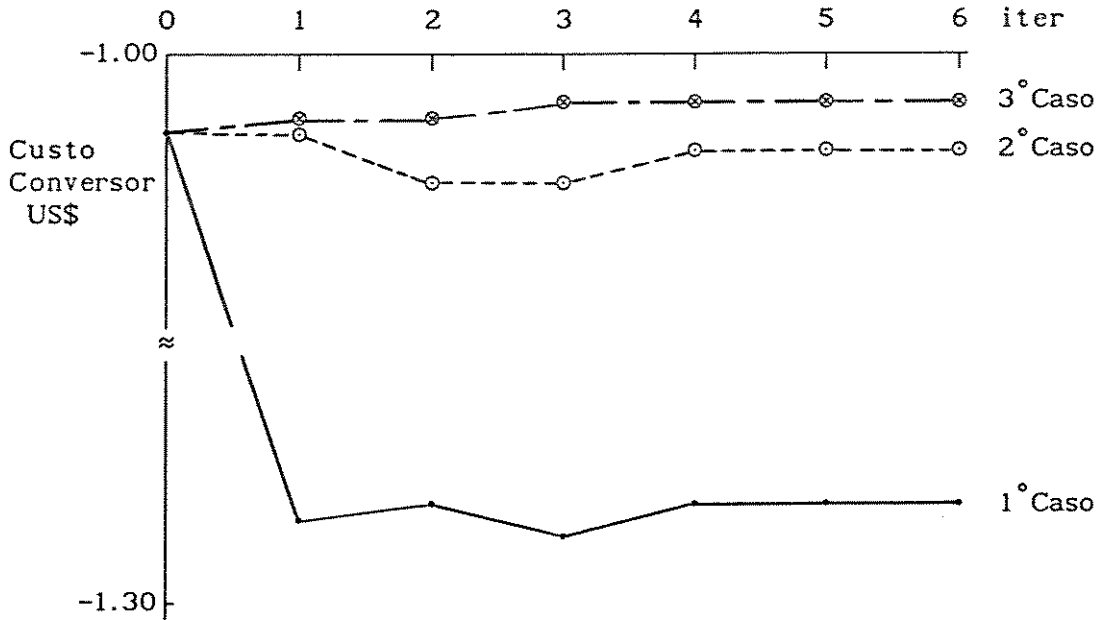


Fig 4.6 - Custo de adição no conversor (Supervisor 1)

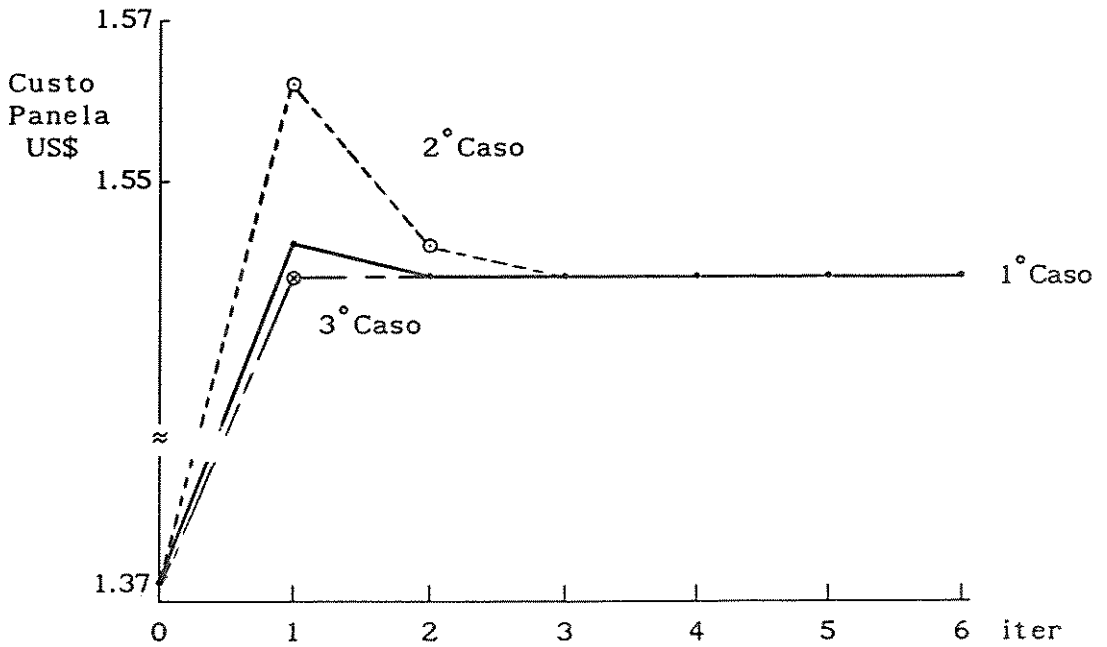


Fig 4.7 - Custo de adição na panela (Supervisor 2)

Assim sendo, pelas equações 3.21 e 3.22 determinam-se as quantidades destes elementos que serão oxidados, e pela equação 3.20, corrige-se o teor objetivo final. Pode-se notar pela equação 3.21 que o grau de oxidação é direta-

mente proporcional à diferença entre o teor de oxigênio no aço de fim de sopro e o aço final objetivado, determinando uma menor adição de ferro-ligas com maior poder desoxidante.

Porém, como a variação entre o teor dos elementos no aço líquido de fim de sopro e o teor dos elementos no aço líquido objetivado diminuiu, a adição de ferro-ligas com teores de carbono mais baixo torna-se predominante, o que implica em um aumento do custo da mistura, pois ferro-ligas com baixos teores de carbono possuem um custo mais elevado.

Uma vez analisado o comportamento dos três subsistemas, coordenador, supervisor do conversor e supervisor da panela, considerando a correspondência com o processo físico, deve-se analisar o comportamento do sistema global.

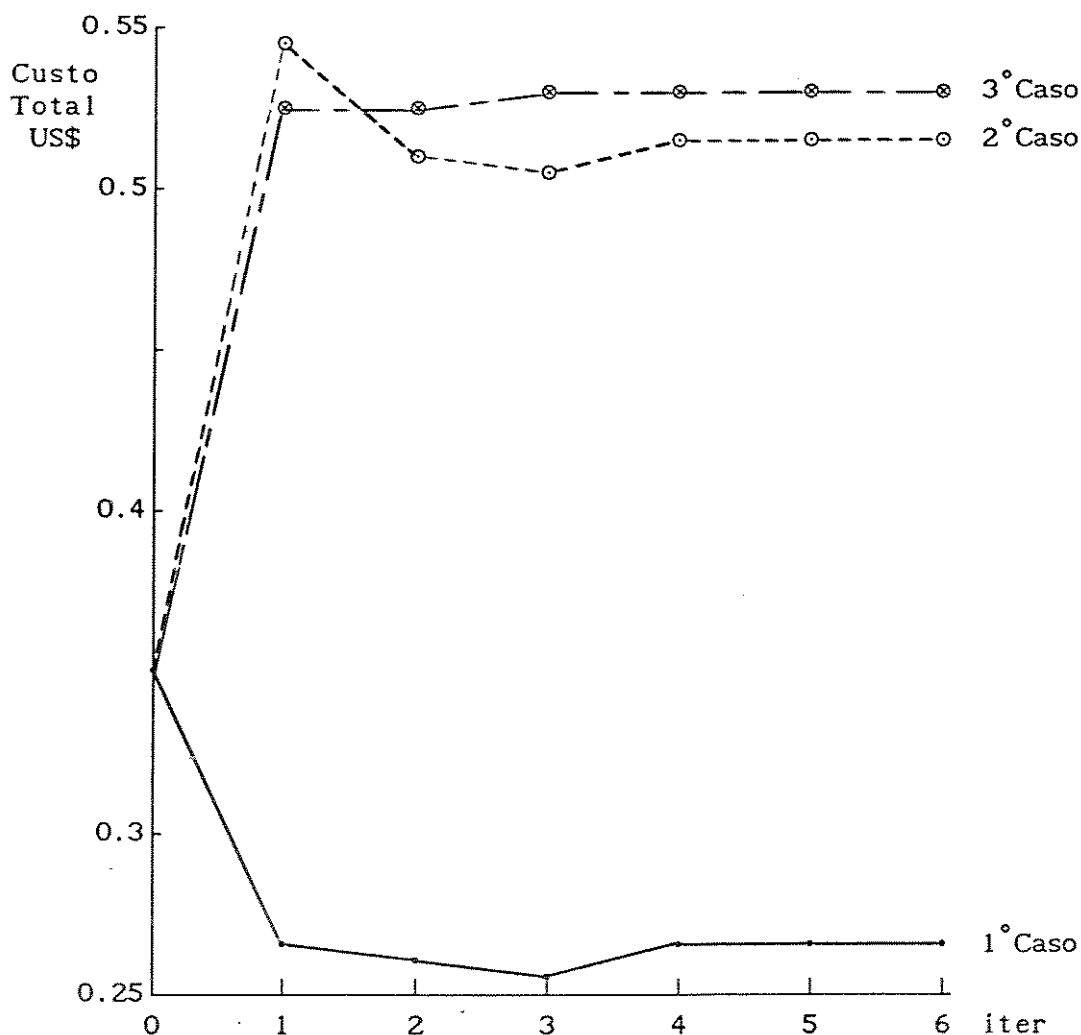


Fig 4.8 - Custo total do sistema

A figura 4.8 apresenta a evolução do custo total para os dois processos, evi-

denciando que para o caso 1 há um melhor desempenho do sistema global, com uma diminuição do custo em 25.62% quando atinge a situação de equilíbrio, com uma correspondente diminuição de 32.43% nas perdas.

Nos casos 2 e 3 há um aumento no custo de 46.04% e 49.18% respectivamente, apesar de terem apresentado uma diminuição das perdas (figura 4.5).

Concentrando a análise sobre o primeiro caso, pode-se notar que a situação de equilíbrio não é aquela que apresenta o melhor desempenho do sistema, mas sim a iteração 3 é que representa o melhor ponto de operação, onde houve uma redução do custo total em 28.51%, bem como uma menor perda no sistema (tabela 4.2).

4.5 - RESUMO

Procurou-se mostrar que a partir dos modelos dos processos físicos extrairam-se as funções objetivos e restrições, sendo então necessárias manipulações matemáticas para ajustar o modelo do sistema numa forma adequada para os algoritmos de otimização.

Mostrou-se também a estrutura geral do sistema computacional, evidenciando o arranjo adotado para um sistema de tomada de decisão.

A seguir, são mostrados os resultados de três casos, ilustrando o comportamento do sistema, a influência dos fatores de ponderação da função objetivo do coordenador sobre as variáveis de coordenação e consequentemente a influência destas sobre o desempenho dos supervisores.

Além disso, é feita uma análise sobre alguns aspectos metalúrgicos, procurando explicar o comportamento do sistema em relação às adições, e como o sistema de suporte à decisão permite procurar pontos de operação que apresentem melhor desempenho para o sistema, mesmo que para situações fora das condições de equilíbrio.

C A P Í T U L O 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

CONCLUSÕES

Neste trabalho mostrou-se um procedimento para abordar sistemas complexos de grande porte, delineando as atribuições dos diversos níveis de uma estrutura hierárquica, as interfaces entre níveis e identificação das funções de informação e intervenção com o objetivo de criar um mapeamento desde o nível de gestão da planta até o controle direto.

No caso do exemplo, adotou-se um subconjunto das funções de coordenação e supervisão bem como do fluxo de informações entre os níveis, que apesar de ser um subconjunto, preserva as idéias e conceitos fundamentais do procedimento proposto. Assim sendo, para a execução das tarefas do sistema exemplo, a estrutura hierárquica e os sistemas funcionais estão representados na figura 5.1, onde $\{ x, y, \dots \}$ representam as funções ou informações citadas na seção 2.3, isto é,

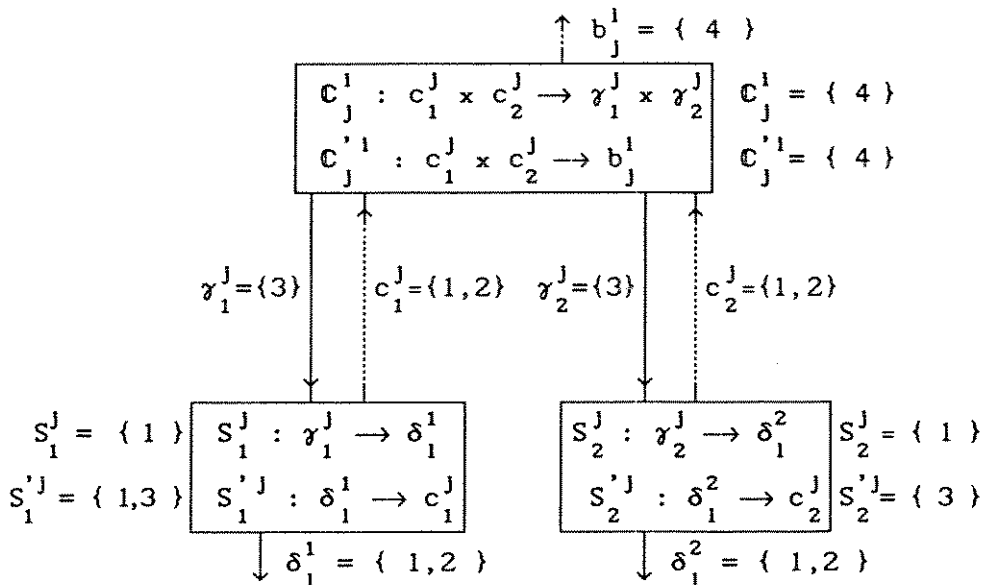


Fig. 5.1 - Estrutura do exemplo adotado

$b_J^1 = \{ 4 \} \rightarrow$ Nível de produção de aço líquido;

$C_J^1 = \{ 4 \} \rightarrow$ Análise dos resultados do processo, determinando as perdas por supervisor e total;

$C_J'^1 = \{ 4 \} \rightarrow$ Controle do nível de produção por supervisor;

$\gamma_1^J = \{ 3 \} \rightarrow$ Práticas operacionais ou alterações, determinando as composições químicas e temperaturas do gusa e do aço de fim de sopro para o supervisor do conversor;

$\gamma_2^J = \{ 3 \} \rightarrow$ Práticas operacionais, determinando a composição química e temperatura de fim de sopro para o supervisor da panela;

$c_1^J = \{ 1, 2 \} \rightarrow$ Nível de produção do supervisor do conversor,
Consumo dos materiais;

$c_2^J = \{ 1, 2 \} \rightarrow$ Nível de produção do supervisor da panela,
Consumo de ferro-ligas;

$S_1^J = \{ 1 \} \rightarrow$ Otimização local do supervisor conversor minimizando o custo da adição;

$S_1'^J = \{ 1, 3 \} \rightarrow$ Nível de produção de aço líquido no conversor,
Controle do consumo dos materiais;

$S_2^J = \{ 1 \} \rightarrow$ Otimização local do supervisor da panela minimizando o custo da mistura de ferro-ligas;

$S_2'^J = \{ 3 \} \rightarrow$ Controle do consumo de ferro-ligas;

$\delta_1^1 = \{ 1, 2 \} \rightarrow$ Programa de produção otimizado do conversor determinando a carga do sistema,
Prática operacional do conversor definindo os materiais que devem ser adicionados;

$\delta_1^2 = \{ 1, 2 \} \rightarrow$ Programa de produção otimizado da panela determinando a mistura ótima de ferro-ligas,
Prática operacional da panela definindo os ferro-ligas a serem adicionados;

O problema global (maximizar produção e minimizar custos) não é atribuição de nenhuma das unidades de decisão dentro da hierarquia, mas sim do sistema de tomada de decisão. Assim sendo, as funções objetivos do coordenador e dos dois supervisores foram desenvolvidas separadamente, definindo as variáveis de coordenação e as variáveis de acoplamento entre os processos. Portanto, o objetivo global não tem uma formulação matemática, sendo de importância a obtenção de uma solução de equilíbrio para o sistema global que seja operacionalmente válida.

Os resultados quanto a convergência do algoritmo implementado na seção 4.4, obtidos a partir de várias simulações, indicam que a solução de equilíbrio corresponde a uma solução do tipo Nash [SIMAAN, 1975], [CRUZ, 1978].

Isto se deve ao fato de que qualquer alteração da solução associada a cada subsistema, isoladamente, deverá fazer com que as funções objetivos dos outros tenham seus valores deteriorados. No entanto, experimentos deverão ser realizados para validar esta indicação, o que usualmente não é uma tarefa muito simples.

O importante, no caso deste trabalho, é que foi obtida uma solução de equilíbrio, cujos valores das variáveis de decisão correspondem a situações realísticas de operação para os processos utilizados como estudo de caso.

A abordagem do sistema de forma hierárquica permitiu uma maior simplicidade na solução dos problemas do nível de supervisão, pois os modelos (item 3.3.) são normalmente não lineares e de solução numérica demorada.

Outro aspecto a se considerar foi que o sistema computacional possibilitou um aumento de capacidade de tomada de decisão, apresentando visões econômicas, metalúrgicas e operacionais do problema de forma integrada.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Existem muitos pontos com respeito ao presente trabalho que indicam a necessidade de estudos adicionais.

Considerações sobre a adição de vários tipos de sucata, objetivando uma mistura ótima dos diversos tipos são necessárias. Uma atenção deve ser dada a alguns parâmetros que neste trabalho foram considerados como constantes, tais como basicidade, perdas do revestimento, relação MgO/SiO_2 e composições químicas dos materiais, pois estes parâmetros não são constantes em casos reais. Seria bom considerar o balanço térmico da adição de ferro-ligas no sistema supervisor da panela, bem como a inclusão das características de interação durante o processo de desoxidação.

Quanto ao aspecto de estrutura hierárquica do sistema, é interessante aumentar a abrangência do sistema, incluindo novos sistemas supervisores e coordenadores, visando abordar passo a passo todo o complexo siderúrgico. Como primeira sugestão, poder-se-ia considerar o sistema de Alto Forno com a inserção de mais um coordenador de Alto Forno e mais um nível que seria o de planejamento da produção da Aciaria e Alto Forno.

O desenvolvimento de um sistema hierárquico baseado em processamento paralelo em um computador ou em rede é bastante interessante pois permitiria a investigação das características de sincronismos entre processos além de se aproximar mais da realidade das instalações industriais.

Uma análise teórica da convergência do algoritmo proposto e a caracterização formal da solução de equilíbrio gerada possibilitaria a investigação de como o problema apresentado neste trabalho se ajusta na teoria geral de coordenação, permitindo assim uma análise matemática precisa.

Por fim, como uma consolidação da metodologia proposta, poder-se-ia elaborar uma ferramenta de especificação e projeto de sistemas hierárquicos multiníveis, incorporando os conceitos e procedimentos aqui definidos visando complementar as ferramentas de desenvolvimento computadorizadas ("Computer Aided Software Engineering - CASE") atualmente existentes.

BIBLIOGRAFIA

- [BROEKHUIS, 1977] - Broekhuis,Ir.H. et alli - *A Real Time Information in a Steel Plant* - IFAC and North - Holland Publishing Company, 1977, pp 43 - 58
- [BRYANT, 1986] - Bryant,G.F., Goulimis,C.N., Dimitriadis,A.G. - *Design of Integrated Production Control Systems for the Paper and Board Industry* - IFAC Instrumentation and Automation in the Paper, Rubber,Plastics and Polymerization Industries, Ohio, 1986, pp 177 - 182
- [CAMPOS, 1980] - Campos,V.F. - *Tecnologia de Fabricação do Aço Líquido : Fundamentos* - UFMG, Belo Horizonte, 1980
- [COHON, 1978] - Cohon,J.L. - *Multiobjective Programming and Planning* - Academic Press, New York, 1978
- [CRUZ, 1978] - Cruz,J.B.Jr. - *Leader - Follower Strategies for Multilevel Systems* - IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. Ac 23, n.2, 1978
- [FINDEISEN, 1980] - Findeisen,W. et alli - *Control and Coordination in Hierarchical Systems* - John Wiley and Sons, 1980
- [FINDEISEN, 1982] - Findeisen,W. - *Decentralized and Hierarchical Control under Consistency or Disagreement of Interests* - Automática, Vol 18, n. 6, 1982, pp 647 - 664
- [FURUKAWA, 1981] - Furukawa,O., Lida,S., Dohjo,K. - *Hierarchical Multilevel Control of Arc Furnace Process with Uncertain Disturbances* - Ironmaking and Steelmaking, 1981, n.2, pp 49 - 65
- [GOMIDE, 1986] - Gomide,F.A.C. - *Controle de Processos Industriais* - 6^o-CBA, Mini-curso, Belo Horizonte, 1986, pp 17 - 28
- [HAIMES, 1988] - Haimes,Y.Y., Li,D. - *Hierarchical Multiobjective Analysis for Large-Scale Systems : Review and Current Status* - Automática, Vol 24, n. 1, 1988, pp 53 - 69

- [HAX, 1975] - Hax,A.C., Meal,H.C. - *Hierarchical Integration of Production, Planning and Scheduling*, in M.A. Geisler (Ed), *Studies in the Management Sciences*, V. 1, 1975 pp 53 - 69
- [HEIDEPRIEN, 1977] - Heideprien,J. - *Digital Computer Applications in the Iron and Steel Industry* - IFAC and North-Holland Publishing Company, 1977, pp 753-767
- [HEIDEPRIEN, 1983] - Heideprien,J. - *Control Theory's View of Metallurgical Process Models in Steel Industry* - IFAC Automation in Mining, Mine-Mineral and Metal Processing, Helsinki, 1983, pp 753 - 767
- [INOUE, 1981] - Inoue,Y. et alli - *Practical Management and Control Systems in the Steel Industry* - Proceedings IFAC Congress, Kyoto, 1981, pp cs 106 - cs 123
- [LONG, 1979] - Long,L.C., Schunk,J.H. - *Applications of Hierarchical Control in the Steel Industry* - Proceedings of the 1979 Joint automatic Control Conference, Denver, Jun 1979, pp 638 - 643
- [MACKULAK, 1979] - Mackulak,G.T., Moodie,C.L. - *A Production Control Strategy for Hierarchical Multi-Objective Scheduling with Specific Application to Steel Manufacture* - Purdue Laboratory for Applied Industrial Control, West Lafayette, Report Number 112, 1979
- [MAHMOUD, 1977] - Mahmoud,M.S. - *Multilevel Systems Control and Applications : A Survey* - IEEE Trans. on Systems Man and Cybernetics, Vol SMC-7, n.3, Mar 1977, pp 125 - 143
- [MESAROVIC, 1971] - Mesarovic,M.D., Macko,D., Takahara,Y. - *Theory of Hierarchical, Multilevel Systems* - Academic Press, New York, 1970
- [MESAROVIC, 1975] - Mesarovic,M.D., Takahara,Y. - *General Systems Theory : Mathematical Foundations* - Academic Press, New York, 1975, Cap 1

- [NACHANDE, 1984] - Nachande,D.M.- *Optimization Methods in Multilevel Systems : A Methodological Survey* - European Journal of Operational Research, 21, 1984, pp 25 - 38
- [NAG, 1978] - NAG - Numerical Algorithms Group, 1978
- [PIERRON, 1986] - Pierron,F. - *Methode de Decomposition - Coordination avec Retour D'Informations. Calcul Hierarchise sur un Processus de Raffinage* - Thèse de Doctorat de 3ème cycle, Institut National Des Sciences Appliquees de Toulouse, 1986
- [SALUKVADZE, 1979] - Salukvadze,M.E. - *Vector-Valued Optimization Problems in Control Theory* - Academic Press, New York, 1979
- [SENBORN, 1983] - Senborn,G., Reljic,S., Guberinic,S. - *Control in the Hierarchically Structures Belgrade Traffic Control System* - IFAC Large Scale Systems, Warsaw, Poland, 1983, pp 695 - 699
- [SIMAAN, 1975] - Simaan,M., Cruz,J.B.Jr. - *Nash Equilibirum Strategies for the Problem of Armament Race and Control* - Management Science, Vol 22, n.1, 1975
- [TARVAINEN, 1982] - Tarvainen,K., Haimes,Y. - *Coordination of Hierarchical-Multiobjective Systems : Theory and Methodology* - IEEE Trans. on Systems Man and Cybernetics, Vol SMC-12, 1982
- [THIERAUF, 1982] - Thierauf,R.J. - *Decision Support Systems For Effective Planning and Control. A Case Study Approach* - Prentice-Hall, 1982
- [WILLIANS, 1985] - Willians,T.J. ed - *Analysis and Design of Hierarchical Control Systems* - Elsevier, Amsterdam, 1985
- [WILLIANS, 1987] - Willians,T.J. - *Recent Developments in the Application of Plant-Wide Computer Control* - Computers in Industry, 8, 1987, pp 123 - 144
- [WISMER, 1971] - Wismer, D.A. - *Optimization Methods for Large-Scale Systems ...with Applications* - McGraw-Hill, New York, 1971