

VANDERLEI BERNARDO

**SISTEMA ESPECIALISTA PARA DETERMINAÇÃO
DAS CONDIÇÕES DE USINAGEM**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo, para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

São Paulo
1995

VANDERLEI BERNARDO

**SISTEMA ESPECIALISTA PARA DETERMINAÇÃO
DAS CONDIÇÕES DE USINAGEM**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo, para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração :
Engenharia mecânica

Orientador :
Nivaldo Lemos Coppini

São Paulo
1995

Aos meus filhos, Mário e Stephanie, que têm sido a grande razão e incentivo de minha vida.

À Fátima pela inesgotável compreensão e incentivo, sempre com muito amor, em todos esses anos de trabalho e dificuldades

A G R A D E C I M E N T O S

Ao amigo e orientador, Prof. Dr. Nivaldo Lemos Coppini, pelo apoio, diretrizes seguras, permanente incentivo e, principalmente, pelo exemplo de vida acadêmica, profissional e pessoal.

Ao amigo Sérgio Rabelo de Almeida, pelo acolhimento nas horas difíceis e companheirismo nas horas de alegria.

Ao professor Dr. Edison Gonçalves pelo auxílio e compreensão nas horas de necessidades.

A todos aqueles, colegas, alunos e amigos, que direta ou indiretamente colaboraram de alguma forma na execução deste trabalho.

SISTEMA ESPECIALISTA PARA DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE USINAGEM

RESUMO	5
CAPÍTULO 1	6
INTRODUÇÃO	6
1.1. INTRODUÇÃO.....	6
1.2. OBJETIVOS.....	8
1.3. JUSTIFICATIVAS	9
CAPÍTULO 2	10
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE A USINAGEM DOS METAIS	10
2.1. GENERALIDADE	10
2.2. PLANEJAMENTO DO PROCESSO DE USINAGEM ASSISTIDO POR COMPUTADOR.	11
2.3. CONSIDERAÇÕES PARA SELEÇÃO DE PARÂMETROS DE USINAGEM.	12
2.3.1 <i>Tipo de operação.</i>	12
2.3.2 <i>Parâmetros da máquina ferramenta.</i>	13
2.3.3 <i>Parâmetros da ferramenta de corte.</i>	13
2.3.4 <i>Características da peça.</i>	13
2.3.5 <i>Parâmetros de operação (diferentes de velocidade de corte e avanço).</i>	14
2.4 MÉTODOS PARA OBTENÇÃO DE PARÂMETROS ÓTIMOS.....	14
2.4.1 <i>Experiência e parecer do planejador, supervisor ou operador da máquina</i>	14
2.4.2 <i>Manuais de usinagem.</i>	14
2.4.3 <i>Sistemas computadorizados de dados de usinagem.</i>	15
2.5 CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS COMPUTADORIZADOS.	15
2.5.1 <i>Sistemas de base de dados.</i>	15
2.5.2 <i>Sistema de modelamento matemático.</i>	16
2.6. COMPONENTES BÁSICOS DE UM BANCO DE DADOS DE USINAGEM.	16
2.6.1 <i>Módulo de arquivo de dados de usinagem.</i>	16

2.6.2 Módulo gerador de modelos.....	17
2.6.3 Módulo de otimização.....	17
2.7. CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS DE UM BANCO DE DADOS PARA USINAGEM.....	17
2.7.1 Confiabilidade.....	17
2.7.2 Modularidade.....	18
2.8 ASPECTOS ECONÔMICOS E TECNOLÓGICOS DA USINAGEM DOS METAIS.....	18
2.8.1 Ciclos e fases de usinagem.....	19
2.8.2 Tempos e métodos de avaliação.....	20
2.9 CURVA DE VIDA E DESGASTE DE FERRAMENTAS.....	27
2.9.1 Formas dos desgastes.....	28
2.9.2 Vida de ferramenta.....	30
2.10 FATORES QUE RESTRINGEM A SELEÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CORTE.....	34
2.11 VELOCIDADE DE CORTE DE MÁXIMA PRODUÇÃO.....	35
2.12 VELOCIDADE DE CORTE DE MÍNIMO CUSTO.....	37
2.13 INTERVALO DE MÁXIMA EFICIÊNCIA.....	38
2.14 TEORIA UTILIZADA PARA A REALIZAÇÃO DO SEDCU.....	39
CAPÍTULO 3.....	42
INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL (IA).....	42
3.1 CONTEXTO GERAL.....	42
3.2 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL X COMPUTAÇÃO CONVENCIONAL.....	44
3.3 PRINCIPAIS TÓPICOS DA IA.....	46
3.3.1. Busca Heurística.....	47
3.3.2. Representação do Conhecimento.....	47
3.3.3. Senso Comum e Lógica.....	47
3.3.4. Processamento de Linguagem Natural.....	48
3.3.5. Visão Computacional.....	49
3.3.6. Sistemas Especialistas.....	50
3.3.7. Robótica.....	50

3.5. IA NO CONTEXTO DA MANUFATURA.....	51
3.5.1. <i>Generalidades</i>	51
CAPÍTULO 4.....	54
SISTEMAS ESPECIALISTAS (SE)	54
4.1. CONTEXTO GERAL.....	54
4.2. COMPOSIÇÃO DOS SES	56
4.2.1. <i>Base de Conhecimento</i>	56
4.2.2. <i>Base de Dados</i>	59
4.2.3. <i>Máquina de Inferência</i>	59
4.3. ALGUMAS ÁREAS DE APLICAÇÃO DE SES.....	62
4.3.1. <i>Em Manufatura (Smart, 1987)</i>	62
4.4. PRINCIPAIS TIPOS DE SES (PASSOS, 1989)	64
4.4.1. <i>Interpretação</i>	64
4.4.2. <i>Previsão</i>	64
4.4.3. <i>Diagnose</i>	64
4.4.4. <i>Planejamento</i>	65
4.4.5. <i>Análise de Desempenho</i>	65
4.4.6. <i>Treinamento</i>	65
4.5. CARACTERÍSTICAS DE UM SE.....	67
4.5.1. <i>Flexibilidade</i>	67
4.5.2. <i>Adaptabilidade</i>	67
4.5.3. <i>Desempenho e Eficiência</i>	67
4.5.4. <i>Explicação do Raciocínio</i>	67
4.5.5. <i>Interação com o usuário</i>	68
4.5.6. <i>Incerteza</i>	68
4.6. FASES PRINCIPAIS DE DESENVOLVIMENTO DE UM SE.....	69
4.7. CONHECIMENTO HUMANO X ARTIFICIAL.....	70
4.8. ARQUITETURA DE UM SISTEMA ESPECIALISTA.....	72

4.9. SISTEMAS ESPECIALISTAS NO CONTEXTO DA MANUFATURA	75
CAPÍTULO 5.....	76
SISTEMAS ESPECIALISTAS PARA DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE USINAGEM (SEDCU)	76
5.1. GENERALIDADES	76
5.2. ARQUITETURA DO SEDCU	80
5.3. AUTOMATIZAÇÃO DO SISTEMA.....	81
5.4 BANCOS DE DADOS (FATOS).....	81
5.5. BANCO DE DADOS DE PEÇAS.....	83
5.6. BANCO DE DADOS DE FERRAMENTAS.....	84
5.7. BANCO DE DADOS DE MÁQUINAS FERRAMENTAS	86
5.8. BANCO DE DADOS DE MATERIAIS.....	87
5.9. BANCO DE DADOS DE PARÂMETROS INTERMEDIÁRIOS DE USINAGEM.....	89
5.10. BASE DE CONHECIMENTO.....	90
5.11. MÁQUINA DE INFERÊNCIA.....	93
5.12 METODOLOGIA APLICADA NA SOLUÇÃO DO PROBLEMA.....	95
5.13 INTERFACE COM O USUÁRIO	96
CAPÍTULO 6.....	100
RESULTADOS, DISCUSSÃO, CONCLUSÕES	100
6.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES	100
6.2 CONCLUSÕES	102
6.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	103
RELAÇÃO DE FIGURAS	104
RELAÇÃO DE TABELAS.....	105
BIBLIOGRAFIA.....	106

RESUMO

Este trabalho trata da determinação das condições de usinagem, com otimização da velocidade de corte, através de sistema especialista implementado com técnicas de inteligência artificial.

O cenário de aplicação está baseado em ambientes que reúnem as seguintes características, conjunta ou parcialmente : *(a)* grandes lotes de peças (diversas arestas de corte são consumidas) ; *(b)* lotes de peças que consumam pelo menos uma aresta de corte, com grande intermitência ; *(c)* a máquina não é o fator limitante do processo.

O método de otimização da velocidade de corte está baseado na análise da velocidade de máxima produção, a qual foi considerada como suficiente para a escolha da velocidade ótima.

ABSTRACT

This work treats about machining conditions determination, with cutting speed optimization, through an Expert System, implemented with Artificial Intelligence techniques.

The application field is based in production environments that bring together, total or partially, the following characteristics: a) large batches of parts (many cutting edges are consumed); b) batches of parts that consume at least one cutting edge, with great intermittence. c) the machine is not considered a restricting issue in the process.

The cutting speed optimization method is based on the analysis of the maximum production speed , which has been considered sufficient for the choice of the optimum cutting speed.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. INTRODUÇÃO

A otimização das condições de produção sempre foi um dos objetivos básicos da indústria e uma das maneiras de otimizar a produção de peças é através da diminuição dos tempos de usinagem. A análise adequada do processo de fabricação permite a redução destes tempos, através da escolha adequada da ferramenta, avanços e profundidades de corte coerentes com a capacidade da máquina ferramenta, etc.

O aumento da velocidade de corte também permite obter uma redução do tempo de usinagem, porém, tem um efeito negativo sobre a vida da ferramenta e trocas mais frequentes podem aumentar o tempo de fabricação, porém deve-se ressaltar que os sistemas automáticos de troca de ferramentas e sistemas de "pre-sets" adequados, tem reduzido consideravelmente este tempo.

A velocidade de corte é o parâmetro que mais influi na vida da ferramenta, enquanto o avanço sofre grande influência da geometria da ferramenta e a profundidade de corte está ligada ao sobremetal existente e potência da máquina-ferramenta.

Quando o número de peças de um lote é muito maior que o número de peças por vida de ferramenta, podemos usar um método prático como o proposto por Vilella (Vilella,1988), onde um pequeno lote piloto pode ser usado para a determinação dos

coeficientes x e k de Taylor, dentro do próprio lote, para um determinado par peça/ferramenta.

Entretanto, quando o número de peças por lote é aproximadamente igual ao número de peças por vida (situação da produção em "*just-in-time*", por exemplo), então o método acima deixa de ser conveniente, pois o lote é insuficiente para ser até mesmo o lote piloto.

Para o caso em que o número de peças do lote ser aproximadamente igual ao número de peças por vida, é desejável que ao terminar-se o lote, também a vida da ferramenta termine, pois a ferramenta deverá ser trocada.. Um valor de velocidade de corte para este caso deve ser calculado de forma otimizada.

Dentro da manufatura existem problemas cuja resolução pode ser automatizada, via ferramentas computacionais, tais como: cálculo geométrico, algoritmos e modelos de simulação, etc. Entretanto, muitos dos problemas encontrados no mundo real pertencem a domínios ainda mal estruturados e insuficientemente conhecidos, como é o caso da usinagem de metais onde há um número muito grande de variáveis que se alteram inclusive com o tempo, e que para a sua resolução exigem recursos originários de experiências práticas e capacitações intrínsecas ao homem, como a memória e o raciocínio.

Atualmente existe uma ferramenta adequada para o tratamento de problemas desta natureza que é a inteligência artificial e o seu segmento de aplicação denominado **sistema especialista**.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é a determinação de condições de usinagem através do desenvolvimento de um sistema especialista, com otimização da velocidade de corte. Este sistema deverá ser utilizado para definir os parâmetros de usinagem em célula de manufatura, para produção em lotes, utilizando-se dos conceitos de tecnologia de grupo e pressupondo a existência de sensores que garantam fixar um determinado critério de fim de vida de ferramentas, que servirá de referência para definir o momento de troca da mesma. Este objetivo será atingido através das seguintes etapas :

- a) Desenvolvimento de um sistema que determine os coeficientes de vida de ferramentas x e k de Taylor, com base no número médio de peças usinadas por vida, contadas durante uma produção normal em ambiente fabril;
- b) Determinação da velocidade de máxima produção, compatível com o intervalo de velocidades empregadas durante a usinagem e , com base nesta velocidade, decidir sobre a velocidade ótima de trabalho;
- c) Mesmo trabalhando em nível de semi-automação, o sistema deverá satisfazer os objetivos a) e b) além de atualizar o banco de dados através de novas informações obtidas na prática e definir valores valores aceitáveis para condição onde o lote de peças é pequeno, porém, suficiente para consumir uma aresta e com grande intermitência, simulando o procedimento de um especialista humano em usinagem.

Podemos observar com clareza os benefícios econômicos ao utilizarmos parâmetros de usinagem otimizados, o que é possível quando se usa um eficiente modelo do processo. No caso deste tipo de sistema , a experiência com resultados ótimos é acumulada numa base de dados que pode ser compartilhada entre muitos usuários, e

evitando-se que a mesma seja perdida devido a ocorrência diversas que podem atingir o especialista humano.

1.3. JUSTIFICATIVAS

A inteligência artificial tende a se firmar como um instrumento poderoso para o aumento da competitividade e a busca da eficácia, isso devido a um perfil econômico mundial que prevê a globalização dos mercados. Esta tecnologia tem se mostrado um instrumento eficiente, tanto a nível prático, quanto econômico (Oliveira,1991).

Um sistema especialista, tenta combinar os dados sobre os quais ele foi informado com possíveis sintomas ou condições que ele reconhece. O programa usa tal evidência para recomendar ou providenciar uma ação (Rosham e Sudesh,1990).

Os sistemas especialistas contém conhecimentos generalizados, como uma coleção de experiências e métodos de resolução de certos problemas dentro de uma área restrita (Krause,1991).

Nos EUA foram observadas economias de US\$ 200.000 até US\$ 1 bilhão. Nas indústrias de manufatura, a aplicação bem sucedida dos sistemas especialistas já é evidente (Schorr,1989).

A aplicabilidade do computador na indústria vem sendo aprimorada e desmistificada, sendo que os mesmos, tornaram-se acessíveis a um número cada vez maior de usuários, e as sofisticadas leis de controle e automação passam a estar à disposição de potenciais aplicações, para realização de estratégias cada vez mais elaboradas na solução de problemas industriais.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE A USINAGEM DOS METAIS

2.1. GENERALIDADE

A partir da década de sessenta, os processos de produção tem sofrido uma profunda transformação devida a introdução da microeletrônica e das tecnologias computacionais. Isto caracteriza-se pela passagem dos meios tecno-econômicos de produção em grandes lotes com produtos energético-intensivos e de automação rígida para a produção em pequenos lotes com produtos informáticos-intensivos e de automação flexível (Perez,1984).

A automação flexível da manufatura deverá ser obtida pela aplicação de computadores em todas as etapas do processo, um sistema que parte do projeto e modelação geométrica do produto e envolve todos os estágios de sua produção.

O conceito genérico da automação flexível de manufatura é conhecido como *Manufatura Integrada por Computador (CIM)*. Dentro deste conceito, a *engenharia concorrente*, passa a fazer parte do cotidiano das empresas através de :

- Projeto assistido por computador (CAD).
- Planejamento do processo e processo assistido por computador (CAPP).
- Programação e controle de produção assistido por computador (CAPSC).
- Automação de Fabrica.
- Integração.

O planejamento assistido por computador é o subsistema responsável pela transformação dos dados de projeto em instruções de trabalho e exige uma elevada cultura tecnológica que se inicia com uma apurada documentação de processos e o estabelecimento de um banco de dados de usinagem, visando a otimização do processo.

2.2. PLANEJAMENTO DO PROCESSO DE USINAGEM ASSISTIDO POR COMPUTADOR.

No processo de usinagem, o planejamento assistido por computador compreende as seguintes etapas (Weil, Spur e Eversheim, 1982):

i - Determinação do método e dispositivo de fixação.

A automação deste estágio é complexa, pois exige padronização de métodos e meios de fixação baseados em princípios de tecnologia de grupo, levando-se em conta um amplo espectro de famílias de peças e características específicas das máquinas.

ii - Determinação automática da seqüência de operações.

Toma-se, neste estágio, diferentes níveis de decisão, segundo o processo (torneamento, fresamento, furação, etc.).

iii - Seleção automática de ferramentas.

Existe neste estágio diferentes níveis de dificuldades que dependem da padronização de ferramentas e elaboração dos respectivos arquivos. Num primeiro caso onde as ferramentas tem dimensões de trabalho fixas, como no caso de brocas, alargadores, rosqueadores, etc, a seleção é mais simples e universal. Porém, quando as dimensões de trabalho são

variáveis, como no caso de torneamento, fresamento, etc, a seleção é feita na empresa através da análise da operação.

iv - Seleção automática de condições de usinagem.

É a escolha da combinação adequada de velocidade de corte, avanço e profundidade de corte para uma operação de usinagem específica. Esta escolha pode ser feita através de um banco de dados ou a partir de modelos matemáticos.

v - Cálculo dos tempos de fabricação.

Os tempos de manobras são calculados por métodos analíticos a partir de tempos elementares ou por métodos estatísticos.

2.3. CONSIDERAÇÕES PARA SELEÇÃO DE PARÂMETROS DE USINAGEM.

Os seguintes parâmetros devem ser levados em consideração para as seleções dadas acima (Groover, 1984) :

2.3.1 Tipo de operação.

a - Tipo de processo : torneamento, fresamento, retífica, furação, etc.

b - Desbaste ou acabamento.

2.3.2. Parâmetros da máquina ferramenta.

- a - Tamanho e rigidez.
- b - Potência.
- c - Velocidades de rotação e avanços.
- d - Máquina convencional ou com controle numérico.
- e - Capabilidade e precisão.
- f - Tempo de operação.

2.3.3 Parâmetros da ferramenta de corte.

- a - Material da ferramenta : aço rápido, metal duro, cerâmica, etc.
- b - Composição química do material da ferramenta.
- c - Propriedades físicas e mecânicas : dureza, resistência ao desgaste, etc.
- d - Tipo de ferramenta : monocortante, broca, fresa, etc.
- e- Geometria : raio de ponta, ângulo de incidência, número de dentes, etc.
- f - Custo da ferramenta.

2.3.4 Características da peça.

- a - Material : básico ou específico.
- b - Dureza e resistência mecânica.
- c - Dimensões e forma.
- d - Tolerância.
- e - Acabamento superficial (rugosidade).
- f - Condições superficiais iniciais.

2.3.5 Parâmetros de operação (diferentes de velocidade de corte e avanço).

- a - Profundidade de corte.
- b - Fluido de corte.
- c - Rigidez da peça.
- d - Dispositivo ou meios de fixação.

2.4 MÉTODOS PARA OBTENÇÃO DE PARÂMETROS ÓTIMOS.

Existem três métodos que permitem obter uma combinação ótima de parâmetros de usinagem (Groover,1984) :

2.4.1 Experiência e parecer do planejador, supervisor ou operador da máquina

Este método possui um grande risco, que é o de se perder o indivíduo com experiência acumulada de muitos anos de oficina.

2.4.2 Manuais de usinagem.

Tais manuais, normalmente, são baseados na experiência de diversas pessoas (experiências de laboratório), e por isso não se aplicam muito bem num ambiente fabril. Pesquisa realizada em chão de fábrica, mostrou que 84% dos avanços e velocidade de corte recomendados pelos manuais era diferente daqueles ótimos utilizados na prática (Metcut Research,1980).

Apresentam, ainda, as seguintes desvantagens :

- a - Suas recomendações tendem a ser conservadoras porque são obtidas para condições críticas de usinagem.
- b - São considerados como um guia geral que podem não coincidir com uma particular linha de produção e máquinas ferramentas numa determinada fábrica (e geralmente não coincide).
- c - Os manuais não são compatíveis com a automação do planejamento do processo auxiliados por uma base de dados computadorizado.

2.4.3 Sistemas computadorizados de dados de usinagem.

Alguns sistemas foram desenvolvidos por empresas particulares com necessidades específicas. A importância deles tem crescido muito com o aumento das máquinas de comando numérico e a necessidade de operar estas máquinas eficazmente. Com os sistemas de informações integrados de manufatura, sua importância é maior ainda.

2.5 CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS COMPUTADORIZADOS.

Os sistemas computadorizados classificam-se em dois tipos (Pressman ,1977):

2.5.1 Sistemas de base de dados.

Este sistema exige a coleta de grande quantidade de dados, quer colhida em laboratórios , quer colhida em condições produtivas. Sua principal

vantagem está em coletar estas informações no próprio meio produtivo, através de resultados já consagrados pelo uso. O uso do método de aquisição de dados por lotes pilotos, fornece aqui dados importantes para a resolução de casos diversos.

2.5.2 Sistema de modelamento matemático.

Estes sistemas vão além da base de dados e seu objetivo é, através de informações de uma base de dados, aplicar modelos matemáticos apropriados e fornecer o conjunto de parâmetros ótimos de usinagem para cada operação, ora com o objetivo de minimizar custo, ora com o objetivo de maximizar produção. Estes sistemas são apropriados para resolução de casos onde não é possível a obtenção de lotes pilotos adequados, ou seja, o número de peças é aproximadamente igual ao número de peças por vida.

2.6. COMPONENTES BÁSICOS DE UM BANCO DE DADOS DE USINAGEM.

Os componentes básicos gerais de projeto de um banco de dados , segundo alguns autores (Friedman,1974), consiste em três módulos principais :

2.6.1 Módulo de arquivo de dados de usinagem.

É o arquivo básico e contém dados numéricos de usinagem para várias condições (vida da ferramenta, acabamento superficial, forças de corte, potência de corte, etc) agrupados segundo o material da peça e a operação de usinagem. As fontes desses dados

são os manuais de usinagem, fabricantes de ferramentas, experimentos, laboratórios de pesquisa, produção de fábricas.

2.6.2 Módulo gerador de modelos.

Consiste em rotinas destinadas a estimar as relações matemáticas entre as variáveis do processo e as condições de corte. A construção e definição do conjunto de parâmetros dos modelos é feita a partir dos dados do módulo de arquivo.

2.6.3 Módulo de otimização.

Os dados gerados no módulo anterior entram neste módulo com fins de otimização. O módulo constrói a função objetiva e as equações de restrição do sistema maximizando ou minimizando a referida função sob as restrições.

2.7. CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS DE UM BANCO DE DADOS PARA USINAGEM.

Segundo esse autor (Friedman,1974), duas características fundamentais destes bancos de dados podem ser destacados :

2.7.1 Confiabilidade.

A confiabilidade dos dados dependem da fonte de procedência. Estabelecendo-se uma ordem hierárquica decrescente em confiabilidade dos dados, tem-se :

- a. Dados obtidos nas empresas na usinagem do próprio produto.
- b. Dados obtidos em laboratórios (da empresa ou externos).
- c. Dados fornecidos por centros de dados e analisados por especialistas.
- d. Dados extraídos da literatura sem qualquer análise.

2.7.2 Modularidade.

A modularidade é necessária para facilitar a implantação progressiva (modular) da automação do processo de planejamento de produção e cada módulo deve possuir a propriedade de ser *autônomo*, isto é, poder funcionar independentemente da implementação dos demais módulos.

2.8 ASPECTOS ECONÔMICOS E TECNOLÓGICOS DA USINAGEM DOS METAIS.

Nos últimos anos, devido ao aumento de competitividade do mercado e aos problemas econômicos que atingem as empresas, constatou-se uma preocupação acentuada com relação à minimização dos custos de manufatura. Desta forma a produção deve ser orientada a se obter o máximo lucro, assim como elevado nível de qualidade.

A consulta bibliográfica mostrou que a determinação das condições econômicas de trabalho é feita em relação à velocidade de corte. Quando aumentamos a velocidade de corte, por exemplo, obtemos uma maior taxa de remoção de cavaco e conseqüentemente reduzimos o tempo de usinagem. Porém, este aumento da velocidade de corte reduz a vida da ferramenta, obrigando a trocas mais freqüentes. Normalmente

esse tempo de troca é fixo para determinado conjunto ferramenta, operação, máquina. Assim, existe uma velocidade de corte, conhecida como *Velocidade de corte de máxima produção* ($V_{m\text{xp}}$), onde há um equilíbrio entre os efeitos positivos do aumento da velocidade de corte (maior taxa de remoção de cavaco), e o efeito negativo deste aumento (maior frequência de trocas de ferramentas), onde a soma dos tempos de usinagem por peça e troca de ferramentas é mínimo.

Vilella (Vilella,1989), concluiu que para a determinação da velocidade de corte ótima, velocidade de corte de máximo lucro, a determinação da velocidade de máxima produção é condição suficiente, o que será mostrado mais adiante.

2.8.1 Ciclos e fases de usinagem

O ciclo de usinagem de uma peça pertencente a um lote Z é envolve um ou mais dos seguintes movimentos (Ferraresi,1978) :

- a** - .Aproximação da ferramenta.
- b** - Entrada da ferramenta na peça.
- c** - Corte do material..
- d** - Saída da ferramenta da peça.
- e** - Retorno da ferramenta à sua posição inicial.

Fases de usinagem são trabalhos executados antes, durante e após cada ciclo de usinagem, perfeitamente individualizada das demais, de acordo com a conveniência quanto à determinação dos tempos correspondentes. Um ciclo de usinagem geralmente apresenta as seguintes fases :

- a - Transporte, posicionamento, fixação da peça em bruto ou semi acabada na máquina, e acionamento dos comandos para a partida da máquina.
- b - Aproximação e/ou posicionamento das ferramentas para o início do corte, mudanças de rotação ou avanço.
- c - Operações de corte da ferramenta.
- d - Afastamento ou posicionamento da ferramenta na sua posição inicial.
- e - Inspeção da peça.
- f - inspeção e ajustagem periódica da ferramenta.
- g - Reposição das ferramentas que não mais satisfazem as condições desejadas na peça ou ferramenta (troca e ajustagem inicial). Nas operações de desbaste, tem-se como critério, no geral, a perda da capacidade de corte ou quebra da ferramenta. Nas operações de acabamento os fatores delimitantes são principalmente as tolerâncias dimensionais e a rugosidade superficial.
- h - Acionamento dos comandos para a parada da máquina, desfixação, transporte e posicionamento da peça acabada.
- i - Preparo da máquina para a execução de Z peças, o que só ocorre no início da mesma.

2.8.2 Tempos e métodos de avaliação

Utilizamos as seguintes definições de **tempos em usinagem**:

- a - **Tempo base (t_b)** : é o tempo necessário para que um operador trabalhando em ritmo normal execute todas as fases de uma operação de

usinagem, segundo um método previamente estabelecido. A fase i é executada pelo preparador da máquina.

b - Tempo padrão (t_e) : corresponde ao tempo resultante da soma do tempo base com os tempos suplementares. Os tempos suplementares são aqueles que compensam eventuais variações das condições de trabalho, normalmente expressas em tolerâncias (percentuais). Estas tolerâncias são as seguintes:

- a) Tolerância para necessidades pessoais.
- b) Tolerância para fadiga mental e física.
- c) Tolerância de inspeção.
- d) Outras tolerâncias: leitura de desenhos, limpeza, paradas imprevistas de máquina, etc.

Para a obtenção dos tempos de usinagem necessários aos nossos cálculos, podemos utilizar um dos seguintes **métodos de avaliação de tempo** :

- a) **Estimativa** : este método pode conduzir a grandes erros, não apresentando nenhum valor científico. Neste método o avaliador usa a sua experiência ou recorre a tabelas, aplicando o bom senso para fixar valores que lhe parecem adequados. Seu uso somente é indicado quando uma avaliação mais precisa e cara não seria compensador.
- b) **Comparação com operações semelhantes** : este método está baseado na previsão da duração dos tempos manuais e de máquina, em

operações semelhantes, cujos tempos são conhecidos com suficiente precisão.

- c) **Por cálculo a partir de tempos elementares** : constitui o método que melhor vantagens oferece quanto à precisão obtida.
- d) **Por cronometragem** : implica na existência física das operações cujos tempos devem ser avaliados, porém é, sem dúvidas, o mais preciso de todos.
- e) **Por cálculo a partir de equações** : aplicável à determinação dos tempos de corte e de reposição.

2.8.3 Tempo de fabricação

O tempo de fabricação inclui todos aqueles tempos necessários para realizar uma fase de usinagem. Este tempo está dividido em dois grupos gerais (Ferraresi,1978) :

- a) **Tempos manuais** : a incluem todos os movimentos necessários para a operação de corte, exceto esta. Consta de elementos que dependem da habilidade do operador.
- b) **Tempos de máquina** : a contagem deste tempo começa quando a ferramenta toca a peça e termina quando esta se retira. Este tempo depende da capacidade da máquina, do qualidade da ferramenta, do material da peça, etc.

O tempo total de confecção por peça para um lote de Z peças é dado por :

$$t_t = t_c + t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} + t_r \quad \text{Equação 1}$$

onde :

t_t - tempo total de execução de uma peça.

t_c - tempo de corte da peça, correspondente à fase c.

t_s - tempos secundários de usinagem, correspondentes às fases a , e , f , h

.

t_a - tempo de aproximação e afastamento da ferramenta, correspondente às fases b , d .

t_p - tempo de preparação da máquina, correspondente à fase i .

t_r - tempo de reposição da peça, troca e ajuste inicial das ferramentas, correspondente à fase g.

2.8.3.1 Tempo de corte

Entende-se por tempo de corte de uma operação de usinagem, ao espaço de tempo em que as ferramentas efetivamente trabalham removendo cavaco da peça. Veremos aqui somente o caso de quando as ferramentas atuam isoladamente, não havendo sobreposição de tempos de corte.

O tempo de cote t_c correspondente ao percurso de corte l_a é dado por :

$$t_c = \frac{l_a}{V_a} = \frac{l_a}{a.n} \quad \text{Equação 2}$$

e

$$n = \frac{v.1000}{\pi.d} \quad [\text{m / min}] \quad \text{Equação 3}$$

onde :

l_a - percurso de avanço da ferramenta.

V_a - velocidade de avanço da ferramenta.

a - avanço da ferramenta.

n - rotação do eixo árvore.

d - diâmetro externo da peça.

2.8.3.2 Tempos secundários

Os tempos secundários são analisados através de tempos e métodos, visando a economia de movimentos e a diminuição dos tempos envolvidos.

2.8.3.3 Tempo de preparação

Neste tempo se incluem todos os tempos preliminares empregados em preparar a máquina para a usinagem da peça. Os tempos que excedem a cifra normal para um

trabalho ao se fabricar as primeiras peças, são incorporados à preparação. Para efeito de cálculo de tempo de preparação, sempre se parte do tempo total de instalação, sem contar com a possibilidade de se aproveitar algo previamente instalado.

2.8.3.4 Tempo de reposição

Entende-se por tempo de reposição t_r de uma operação de usinagem, ao tempo efetivamente gasto por peça para a troca e ajuste de todas as ferramentas envolvidas na operação, que não mais satisfazem as condições de usinagem desejadas. O tempo de reposição está diretamente ligado ao número de peças usinadas por vida de ferramenta (Z_f), pois este define a frequência das paradas da máquina para troca e colocação da ferramenta. Em geral o tempo de troca envolve as seguintes etapas :

- a) Acionamento dos comandos da máquina para a parada da mesma, do fluxo de fluido de corte, etc.
- b) Desfixação da ferramenta e sua retirada do suporte. No caso das pastilhas de metal duro corresponde à troca, giro ou inversão da pastilha.
- c) Afição da ferramenta. Esta etapa inexistente com os insertos de metal duro e no caso de outras ferramentas que sejam passíveis de afiação, normalmente existe uma ferramenta de reserva, o que possibilita o aproveitamento deste tempo.
- d) Fixação da ferramenta em seu suporte e ajustes finais.

Portanto, o tempo total de reposição é o tempo em que a máquina ferramenta fica parada para a troca de ferramentas multiplicado pelo número de vezes que isso ocorre, para um determinado lote de peças.

Para a **determinação do tempo de reposição** e admitindo-se que a máquina é inicialmente preparada com m arestas já afiadas, tem-se para a ferramenta de ordem i :

$$t_n = \frac{n_b(t_{fi} + t_{fa})}{Z} \quad \text{Equação 4}$$

e

$$n_b = \frac{Z}{Z_b} - 1 \quad \text{Equação 5}$$

onde :

t_{fi} - Tempo de reposição da i -ésima ferramenta.

n_{bi} - Número total de trocas da i -ésima ferramenta, num lote com Z peças.

t_{fi} - Tempo de troca e ajuste, correspondente a cada i -ésima ferramenta.

t_{fai} - Tempo de afiação da i -ésima ferramenta, se houver.

Z_{bi} - Número de peças usinadas por vida pela i -ésima ferramenta.

Então, para trocas individuais de ferramentas tem-se :

$$t_r = \sum_{i=1}^m t_n \quad \text{Equação 6}$$

$$t_r = \frac{1}{Z} \sum_{i=1}^m n_n (t_{fi} + t_{fa}) \quad \text{Equação 7}$$

$$t_r = \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{Z_{Ti}} - \frac{1}{Z} \right) * (t_{fi} + t_{fa}) \quad \text{Equação 8}$$

O tempo total de confecção por peça é, portanto :

$$t_t = \sum_{i=1}^m \frac{\pi \cdot d \cdot l_a}{1000 \alpha \cdot v_i} + t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} + \sum_{i=1}^m \left[\left(\frac{1}{Z_{Ti}} - \frac{1}{Z} \right) * (t_{fi} + t_{fa}) \right]$$

Equação 9

2.9 CURVA DE VIDA E DESGASTE DE FERRAMENTAS

Para se aplicar um plano de trocas de ferramentas faz-se necessário ter um controle freqüente das condições de usinagem, temperaturas atingidas, força de corte, desgaste da ferramenta, acabamentos superficiais, etc, com o propósito de se obter dados a respeito das vidas prováveis das ferramentas e estabelecer as melhores condições de corte.

O critério de vida da ferramenta está relacionado diretamente com as características das operações de usinagem. O critério mais simples para a determinação

da perda da capacidade de corte da ferramenta é aquele que admite a destruição total da aresta cortante.

2.9.1 Formas dos desgastes

Três formas de desgaste ocorrem no corte dos metais:

- a) **Desgaste por aderência:** a ferramenta e o cavaco se soldam em asperezas locais e o desgaste ocorre pela fratura das junções soldadas.
- b) **Desgaste por abrasão:** ocorre como resultado da presença de partículas duras na interface cavaco-ferramenta, à medida que o cavaco se move sobre a superfície de saída, desgastando-a por ação mecânica.
- c) **Desgaste por difusão inter metálica:** acontece, mesmo no estado sólido, entre o material da peça e a ferramenta, em condições de temperatura elevada e pressão, existentes na interface cavaco-superfície de saída. A perda de certos constituintes nas reações provocadas pela difusão, enfraquece a resistência mecânica da ferramenta.

Podemos encontrar os seguintes tipos de desgaste na ferramentas de corte :

- a) **Desgaste frontal (I_f) :** este tipo de desgaste é relativamente fácil de medir, por isso há várias referências com relação a ele, como gráficos da largura de desgaste em função do tempo de usinagem.

- b) **Desgaste tipo entalhe (l_n)** : é uma ranhura que desenvolve-se na superfície principal de folga, onde o diâmetro externo da peça está sendo usinado. Em casos onde o desgaste de entalhe predomina sobre todos os outros fenômenos de desgaste, o comprimento deste desgaste (l_n) pode ser utilizado como medida do desgaste da ferramenta.
- c) **Desgaste da superfície de saída ou de cratera** : é o tipo de desgaste mais comum de ocorrência. Sua principal causa é a difusão devido a elevada temperatura e pressão desenvolvidas na interface entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta. A profundidade de cratera (C_p) pode ser utilizada como medida de desgaste da ferramenta e um valor pré determinado deste desgaste pode ser definido como critério de fim de vida da ferramenta. Em casos especiais, a distância (C_d) do centro da cratera à aresta de corte e a largura da cratera (C_l) podem ser medidas como informação adicional.
- d) **Desgaste da aresta secundária** : no torneamento, a superfície usinada é principalmente formada pela ponta da ferramenta e a aresta lateral de corte. Isso significa que qualquer modificação na ponta da ferramenta afeta a superfície usinada. Uma avaliação direta deste tipo de desgaste da ferramenta é difícil, mas seus efeitos podem ser detectados pela medida de rugosidade da superfície usinada. Um certo valor da rugosidade pode ser utilizado como critério da vida da ferramenta.

- e) **Deformação da ponta da ferramenta** : pode ocorrer sob efeito de temperaturas elevadas existentes na zona de corte. A deformação na ponta causa uma modificação na geometria da mesma, o que prejudica a precisão e o acabamento superficial da peça usinada. Entretanto esta deformação não pode ser usada como critério de fim de vida .
- f) **Desprendimento de lascas** : o desprendimento de lascas de finas partículas da aresta de corte e o choque térmico, que ocorre com frequência nos cortes interrompidos, são importantes em ferramentas de material quebradiço. A quantidade de lascamento e choque térmico é avaliado pela máxima largura de desgaste da aresta de corte (I_l) .
- g) **Falha prematura** : toda anomalia, toda espécie de falha imprevisível da ferramenta e grandes deformações, as quais causam a inutilização imediata da ferramenta, podem ser causadas por um ponto duro no material ou um acidente durante a operação da máquina-ferramenta.
- h) **Ruptura por quebra da ponta** : esta falha ocorre devido à elevada temperatura desenvolvida na região de corte.

2.9.2 Vida de ferramenta

A vida da ferramenta é um parâmetro muito importante no corte dos metais. Em um sentido geral, o fim de vida da ferramenta é determinada pelo instante a qual a ferramenta não produz mais peças em condições satisfatórias. No entanto, normalmente se utiliza critérios mais específicos e palpáveis de fim de vida da ferramenta.

De maneira mais típica, a vida da ferramenta é definida em termos de um comprimento de desgaste médio ou máximo permissível. Embora menos freqüente, a vida da ferramenta pode se basear na piora do acabamento superficial abaixo de algum limite especificado, ou no aumento da força de corte acima de um determinado valor padrão.

A vida da ferramenta depende do seu material, das propriedades da peça obra, dos parâmetros de usinagem e de outros fatores, tais como o fluido de corte e etc. A facilidade com que um material pode ser usinado esta relacionado com a sua *usinabilidade*. Um material possui boa usinabilidade se o desgaste da ferramenta é pequeno, a vida da ferramenta é longa, as forças de corte são baixas, se o acabamento superficial é aceitável, etc. Existe muitos critérios para avaliar esta propriedade do material, não havendo, entretanto, um padrão para medi-la.

Portanto, denomina-se vida da ferramenta o tempo que a mesma trabalha efetivamente cortando o material, até perder a sua capacidade de corte dentro de um critério previamente estabelecido. Atingindo este tempo, a ferramenta deve ser afiada ou substituída. Logo, a vida da ferramenta é o tempo entre duas trocas sucessivas necessárias, no qual a mesma trabalha efetivamente cortando o material.

Alguns critérios de fim de vida de ferramenta, com a conseqüente troca da mesma, podem basear-se nos seguintes fatos :

- a) O desgaste da superfície de saída atinge proporções elevadas e pré-definidas, o que pode provocar a quebra da aresta cortante.

- b) Os desgastes chegam a valores tais que o atrito da ferramenta com o cavaco provoca temperaturas na qual a ferramenta perde rapidamente a aresta de corte.
- c) O desgaste da superfície de folga da ferramenta não permite mais manter as tolerâncias dimensionais exigidas na peça.
- d) O acabamento superficial da peça não é mais satisfatório.
- e) O aumento da força de usinagem proveniente dos elevados desgaste da ferramenta interfere no funcionamento da máquina.
- f) Outros critérios conveniente ao processo produtivo, dependentes de diversos fatores.

Para o levantamento das curvas de vida, deve-se, geralmente, construir em primeiro lugar, gráficos auxiliares que nos fornecem os desgastes em diferentes velocidades e tempos de trabalho, para determinado par peça-ferramenta. De posse destas curvas, fixa-se o valor do desgaste que definirá o fim de vida da ferramenta, nas condições de usinagem desejadas.

A representação em gráfico com escala dilogarítmica da função $T=f(v)$ -**curva de vida da ferramenta** - aproxima-se de uma reta. Neste caso, tem-se a expressão :

$$T \cdot v^x = K \quad \text{Equação 10}$$

onde :

T é a vida da ferramenta dada em min.

x é o coeficiente angular da reta ($x = -k$).

K é a vida da ferramenta para uma velocidade de corte de 1m/min.

Depois das pesquisas de Taylor, diversos estudiosos propuseram vários modelos matemáticos relativos à vida de ferramenta, porém a equação de Taylor além de ser a mais simples é a de maior praticidade, pois a obtenção de suas constantes não exige tantos ensaios de usinagem como as demais.

Ainda que as equações empíricas sejam razoavelmente simples, os valores das constantes **x** e **k** de Taylor também dependem de uma série de fatores de difícil controle. Algumas bibliografias mostram que materiais tidos como iguais por diversas normas técnicas, usinados nas mesmas máquinas e nas mesmas condições, podem gerar diferentes comportamentos no desgaste da ferramenta de metal duro, mesmo quando provenientes de lotes distintos de mesma origem. A rigidez do conjunto máquina - ferramenta é outro fator de difícil determinação, mesmo porque esta pode variar com o tempo e estado de conservação, interferindo de forma significativa no desgaste da ferramenta. Formato, geometria, quebra cavaco, porta ferramentas, e etc, também exercem significativa influência no processo de desgaste.

Estes fatores, de difícil quantificação, não inviabilizam a fórmula de Taylor, pois através de uma metodologia adequada é possível determinar as suas constantes nas reais condições de trabalho, o que veremos adiante como fazer

2.10 FATORES QUE RESTRINGEM A SELEÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CORTE

- a) **Restrição devido ao máximo avanço da máquina ferramenta :** quando o fator limitante é este elemento, uma das alternativas é selecionar o máximo avanço fornecido pela máquina e calcular a velocidade de corte ótima através da expressão adequada.
- b) **Restrição devido à máxima velocidade de corte :** a máquina, normalmente, possui uma rotação máxima de trabalho, onde aplicando a equação 3 para um determinado diâmetro de peça obtemos a máxima velocidade de corte que poderemos obter. Caso a velocidade de corte calculada seja maior que a velocidade máxima da máquina, esta última deve ser utilizada.
- c) **Restrições devido à potência da máquina :** a potência de usinagem é dada por : $N = (v_c \cdot f_c + v_a \cdot f_a)$.Esta potência não deve ser superior à potência disponível no eixo da máquina. Assim, para avanço e profundidade de corte fixos, a velocidade de corte máxima deve levar em consideração essa restrição.
- d) **Restrição devido ao acabamento superficial :** a rugosidade máxima está relacionada com o avanço e o raio de ponta da ferramenta através da expressão :

$$R_{max} = \frac{a_t^2}{8R} \quad \text{Equação 11}$$

Assim, para um determinado acabamento superficial e uma geometria de ferramenta, existe um valor máximo admissível do avanço, o qual deve ser usado para o cálculo da velocidade de corte desejada.

2.11 VELOCIDADE DE CORTE DE MÁXIMA PRODUÇÃO

A determinação do mínimo tempo de fabricação por peça é feito derivando-se a equação 9 em relação à velocidade de corte, fazendo o avanço e a profundidade de corte constantes, assim:

$$dt_t = \frac{d}{dv} dt = 0 \quad \text{Equação 12}$$

obtemos :

$$t = \frac{-l_a \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot a \cdot v} + \frac{(x-1) \cdot l_a \cdot \pi \cdot d \cdot v^{x-2}}{1000 \cdot a \cdot k} \cdot t_f = 0 \quad \text{Equação 13}$$

Podemos obter da equação 13, a velocidade de máxima produção, assim :

$$V_{max} = \sqrt[x]{\frac{k}{(x-1) \cdot t_f}} \quad \text{Equação 14}$$

A velocidade de máxima produção é a velocidade de corte para a qual a soma dos tempos de troca da ferramenta e de usinagem são mínimos.

Como pode-se observar, na equação 14, para o cálculo da velocidade de máxima produção é necessário a obtenção de :

- a) Tempo de troca de ferramenta (t_{ft}).
- b) Expoentes da equação de Taylor (x , k), sendo que o expoente x representa a sensibilidade de vida da ferramenta para a variação da velocidade de corte, e k representa a influência do material, isto é, pode ser interpretado como a vida da ferramenta para uma velocidade de corte de 1m/min.

A equação 14, apesar de obtida para o caso do torneamento cilíndrico, pode ser utilizada para outros processos, desde que sejam aplicados conceitos de equivalência e que a máquina possa trabalhar com velocidade de corte constante.

A obtenção dos expoentes x e k da equação de Taylor em condições de laboratório, normalmente induzem a erros quando extrapolados às condições de produção devido aos seguintes fatores :

- a) Variação da velocidade de deformação e cisalhamento do metal na região de corte.
- b) Variação da forma da secção de corte, devido aos valores da profundidade de corte e avanço ao longo do perfil usinado influírem no valor e na localização das áreas onde, instantaneamente, a velocidade de desbaste da ferramenta é maior.
- c) A ferramenta é afetada pelos sucessivos aquecimentos e resfriamentos, devido a variações das condições de usinagem, Fluxo de fluido de corte ou então pelas periódicas entradas e saídas da ferramenta na área usinada.
- d) As vibrações possuem amplitudes e frequências variáveis ao longo do perfil usinado.

2.12 VELOCIDADE DE CORTE DE MÍNIMO CUSTO

A velocidade de corte de mínimo custo é dada por (Novaski,1990) :

$$V_0 = \sqrt[3]{\frac{C_2 \cdot k}{60 \cdot (x - 1) \cdot C_3}} \quad \text{Equação 15}$$

onde:

$$C_2 = S_h + S_m \quad \text{Equação 16}$$

$$C_3 = k_f + \frac{t_f}{60} \cdot (S_h + S_m) \text{ Equação 17}$$

A velocidade de mínimo custo é a velocidade para a qual existe um equilíbrio entre o custo referente ao salário-homem e salário-máquina de um lado e o custo do número de ferramentas utilizadas no outro.

A velocidade de corte de mínimo custo encontra como principal barreira a obtenção dos parâmetros econômicos de difícil acompanhamento. Porém, veremos mais adiante que para a obtenção da velocidade de corte ótima, somente precisaremos nos basear na velocidade de corte de máxima produção.

2.13 INTERVALO DE MÁXIMA EFICIÊNCIA

Defini-se intervalo de máxima eficiência, ao intervalo compreendido entre as velocidades V_0 e V_{mxp} . Este intervalo está limitado pelos valores de velocidade de corte de máxima produção e de mínimo custo.

Para velocidades menores que V_0 , tem-se um aumento no custo de produção por peça e uma diminuição na produção. Analogamente, para valores da velocidade de corte maiores que V_{mxp} , há um acréscimo do custo de produção e uma queda na produção. Porém, para valores crescentes de V , a partir de V_0 , até a V_{mxp} , haverá um aumento no custo da produção, mas também, um aumento na produção.

2.14 TEORIA UTILIZADA PARA A REALIZAÇÃO DO SEDCU

A teoria legada por Taylor indica que é condição necessária trabalhar-se com velocidade de corte contida no intervalo de máxima eficiência.

Vilella e Cupini (Vilela 1988) concluíram que a determinação do intervalo de máxima eficiência não é condição necessária para a otimização da velocidade de corte, sendo a determinação da velocidade de máxima produção condição suficiente para isso. Estes autores calcularam o índice D , sempre maior que 1, dado por :

$$D = \frac{V_{\text{exp}}}{V_0} > 1$$

Equação 18

No mesmo trabalho, foi analisada a variação do custo total de fabricação, quando $D \rightarrow 1$ e quando $D \rightarrow \infty$, com as seguintes conclusões :

$D \rightarrow 1$ quando ocorrem as seguintes situações, isoladas ou simultaneamente:

- O custo da ferramenta, K_{ft} , tende a valores muito baixos.
- O salário-homem, Sh , tende a valores muito altos.
- O salário-máquina, Sm , tende a valores muito altos.
- O tempo de troca da ferramenta, t_{ft} , tende a valores muito altos.

Portanto, sempre que tivermos este caso, a $V_{m\text{xp}}$ tende a coincidir com a V_0 .
Torna-se condição suficiente conhece-la para se ter a referência na definição da velocidade de corte ótima.

$D \rightarrow \infty$, quando ocorrem as seguintes situações , isoladas ou simultaneamente :

- O tempo de troca da ferramenta , t_{ft} , tende a valores muito baixos, o que leva ao aumento do custo do ferramental, e neste caso, deve-se ter cuidado ao afirmar que a obtenção de $V_{m\text{xp}}$ é condição suficiente para a definição da velocidade de corte mais adequada. Em situações práticas no entanto, pode-se considerar esta situação pouco comum, porque a redução de t_{ft} leva a valores muito elevado da $V_{m\text{xp}}$, dificilmente utilizados. Assim, velocidades de corte menores que $V_{m\text{xp}}$ são adotados, o que vira em favor de um custo mais reduzido.
- O custo da ferramenta K_{ft} tende a valores muito altos, esta é uma situação crítica, pois observa-se que tanto a variação do custo total de fabricação como o custo por peça para a velocidade máxima de produção tem tendência crescente; e, numa situação desse tipo a escolha de $V_{m\text{xp}}$ como velocidade de trabalho pode elevar os custos a valores muito altos. Portanto, especialmente em situações onde o custo da ferramenta é muito alto, não se deve generalizar a escolha da

V_{mxp} como velocidade ótima. O mais adequado seria nesses casos, fazer uma avaliação individualizada da situação.

Na ausência do valor da velocidade de mínimo custo para referenciar a velocidade de mínimo custo para referenciar a velocidade ótima à ser escolhida, os autores acima referidos recomendam adotar-se valores entre 10% a 20% inferiores à V_{mxp} . Esta porcentagem poderá ser estimada com maior precisão, através de processos estatísticos, quando o sistema for alimentado com informações suficientes, e confiáveis, obtidas em casos práticos.

CAPÍTULO 3

INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL (IA)

3.1 CONTEXTO GERAL

A Inteligência Artificial (IA) é simplesmente uma maneira de fazer o computador pensar inteligentemente (Arariboia, 1988). Isto é conseguido, estudando como as pessoas pensam quando estão tentando tomar decisões e resolver problemas, dividindo esses processos de pensamentos em etapas básicas e projetando um programa de computador que solucione problemas usando essas mesmas etapas (Levite et al., 1988).

É então, um método estruturado de projetar programas complexos de tomada de decisões. Consiste num dos temas mais importantes desta área desde o surgimento do transistor (Schildt, 1989). Seu sucesso hoje está baseado principalmente nos Sistemas Especialistas (SE), que foram os produtos financeiramente mais bem sucedidos em IA; na boa receptividade da IA entre os japoneses e na lenta, mas forte integração das técnicas de IA nas aplicações já existentes.

Visa basicamente (Kowalski, 1983/84) projetar máquinas inteligentes (hardware) e processos computacionais (software) mais úteis e com entendimentos inteligentes.

As ferramentas e técnicas desenvolvidas em IA solucionam importantes problemas e criam novas oportunidades (Smart, 1987).

Os programas computacionais com os quais a IA está relacionada são primariamente processos simbólicos envolvendo complexidade, incerteza e ambigüidade. Esses processos são usualmente aqueles para os quais não existem soluções algorítmicas e, é necessário pesquisar a solução (Lucena, 1987) em um universo bastante grande de alternativas, ou seja, problemas típicos do ser humano no dia-a-dia (Cunha e Ribeiro, 1987). Portanto, IA trata com tipos de problemas (soluções) que o ser humano encontra continuamente no mundo. Essa forma de solucionar problemas difere daquela utilizada nos cálculos tradicionais de engenharia e cálculos científicos, que são essencialmente de natureza numérica e, para os quais as soluções são conhecidas e produzem respostas satisfatórias. No entanto, como programas de IA tratam com palavras e conceitos, nem sempre uma solução correta é garantida. Algumas respostas erradas são toleradas, assim como ocorre quando um ser humano resolve um problema (Passos, 1985) (Lucena, 1987).

Automação Industrial é um processo, que se inicia com a substituição de esforço muscular ou animal por maquinário de algum tipo. Esse processo existe desde o início do século vinte como esforço organizado, e até antes, ainda que de forma mais experimental. Por exemplo, pode-se automatizar através do uso de multiplicadores mecânicos de forma humana, sem uso de qualquer outra fonte de energia do que o próprio braço do operário. Outra forma de automatização ocorre através de uso de ar comprimido, e uma terceira alternativa é o uso de elementos de máquina acionados por eletromagnetismo. Todas as alternativas contêm elementos de "inteligência" pré-

programados de forma a obter respostas desejadas a partir de estímulos físico-químicos pré-definidos. Com o desenvolvimento da informática, tem sido possível substituir a dependência à confiabilidade comportamental das materiais através de lógica desenvolvida por humanos. Em outras palavras, a “inteligência” do processo deixa de depender diretamente de estímulos físico-químicos (Carvalho, 1993).

A indústria tem um potencial muito grande de inovação com o uso integrado da Informática e da Automação, o que dá à indústria grande flexibilidade (Oliveira, 1990).

Para que a automação de uma determinada tarefa seja bem sucedida, é necessário que a máquina que passará a realizá-la seja capaz de desempenhar cada uma das etapas constituintes do processo a ser automatizado com eficiência, de modo a garantir a repetibilidade do mesmo (Saliba, 1992).

3.2 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL X COMPUTAÇÃO CONVENCIONAL

Uma comparação entre a IA e a Computação Convencional, e seus principais tópicos, são apresentados a seguir (Passos, 1985):

<u>Programação em Inteligência Artificial</u>	<u>Programação Convencional</u>
• Processamento Simbólico	• Processamento Numérico
• Busca Heurística (Passos da solução implícita)	• Busca Algorítmica (Passos da solução explícita)
• Estrutura de controle normalmente separada do domínio do conhecimento	• Estrutura de controle e informação integrados
• Fácil de modificar, atualizar e ampliar	• Difícil de modificar
• Algumas respostas incorretas são toleradas	• Apenas respostas corretas são aceitas
• Respostas satisfatórias são aceitas	• É procurada somente a melhor solução

Tabela 1 - Comparação entre IA e Computação Convencional

Uma das características centrais da programação em IA é a busca heurística e não algorítmica, e as linguagens tradicionais como o Basic ou Pascal, vêem o programa como uma receita a ser seguida cegamente. Já as linguagens utilizadas para programação em IA vêem o programa como sendo a descrição das condições sob as quais a solução do problema deve ser procurada. E ela encontra a referida solução sem auxílio do programador, confiando apenas na lógica. Em suma, linguagens convencionais só fazem aquilo que o programador manda, enquanto que programação que utiliza os princípios de IA faz o que as leis da lógica determinam (Costa e Gurgel, 1985).

Os programas de IA possuem estruturas de controle separadas do domínio de conhecimento, e esse conhecimento estará disponível para ser usado quando necessário na solução de um problema, podendo dessa forma, executar somente a troca de base de

dados quando necessário. Em programas convencionais, as trocas de bases de dados geralmente acarretam grande impacto para o programa, sendo normalmente imprescindível grandes modificações em sua estrutura básica, ou até mesmo necessidade de construção de um programa diferente para acessar essa nova base de dados.

3.3 PRINCIPAIS TÓPICOS DA IA.

Pode-se, através de um diagrama (Figura 1.) visualizar algumas das aplicações de IA.

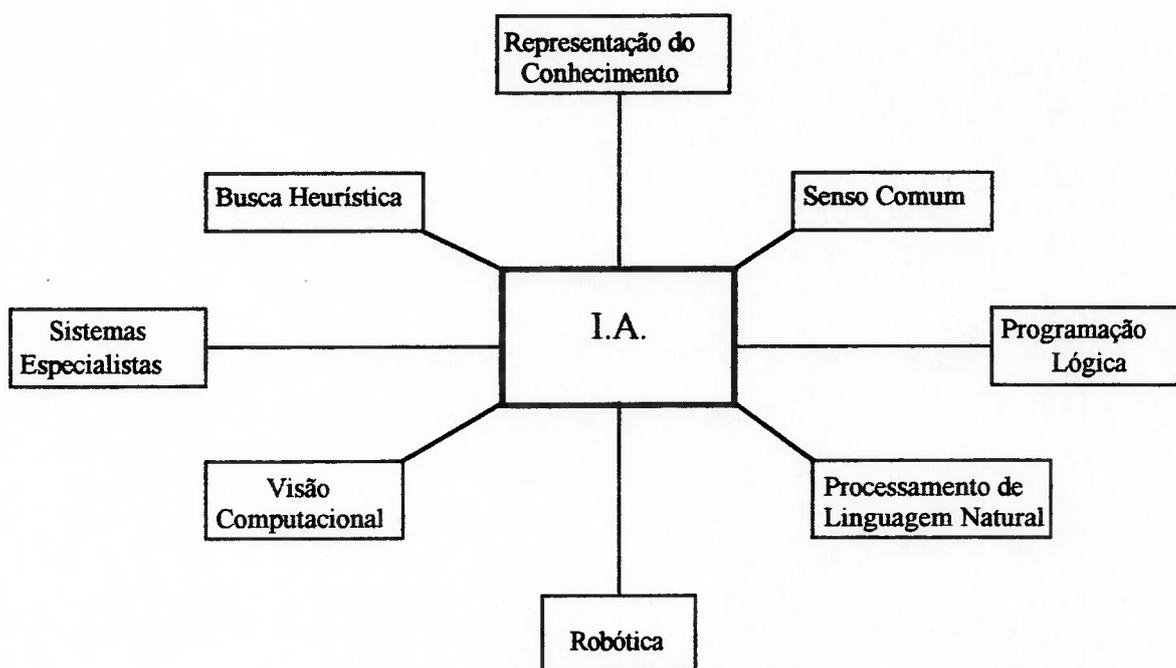


Figura 1 - Principais Aplicações de IA

Esses tópicos foram muito bem definidos por Nilsson (Nilsson, 1980):

3.3.1. Busca Heurística

É um método de soluções de problemas em que se usa a tentativa e erro, executada em estrutura de árvore, começando no topo com uma condição inicial e bifurcando cada vez que se toma uma decisão. A busca heurística é uma estratégia para se tentar achar mais rapidamente a solução de um determinado problema.

3.3.2. Representação do Conhecimento

Procedimentos inteligentes não são baseados somente em métodos de raciocínio, mas principalmente no conhecimento armazenado (devido ao vasto conhecimento que um ser humano adquire durante a vida, tornando-o um especialista em determinada área). Para que a exploração do conhecimento possa ser feita, é vital que este seja representado de forma idônea. O formalismo lógico é requisitado, pois sugere uma forma poderosa de se derivar novos conhecimentos a partir dos velhos.

3.3.3. Senso Comum e Lógica

O raciocínio de senso comum é uma das coisas mais difíceis para se modelar em um computador. Senso comum é raciocínio de baixo nível, pois está diretamente ligado a aspectos subjetivos como vivência e senso prático. É necessário repassar à máquina regras, para que ela possa executar a programação com entendimento satisfatório. A

representação do senso comum, em sistemas de programação, é considerada um tópico chave em IA, com poucas chances de solução satisfatória em pouco tempo. Uma outra área muito importante em IA é a Programação Lógica, através da qual pode-se realizar deduções através de fatos e regras.

3.3.4. Processamento de Linguagem Natural

Esta área se preocupa em desenvolver programas que entendam a linguagem falada e escrita, visando a interação com máquinas por meio desta mesma linguagem. O processo empregado para se fazer um computador entender sentenças é composto de programas que juntos formam o “analisador de linguagem natural”. As três divisões básicas da análise da linguagem são (Levine et al., 1988):

- **Análise léxica:** análise das palavras;
- **Análise sintática:** análise da colocação das palavras em uma sentença, incluindo as regras de gramática;
- **Análise semântica:** análise do significado de uma sentença em si e em relação a outras sentenças.

O Processamento de Linguagem Natural tem o objetivo de tornar possível a comunicação entre a máquina e usuários não especializados. Esse processamento varia de máquina para máquina, restringindo assim seu uso para pessoas especializadas na maioria das vezes.

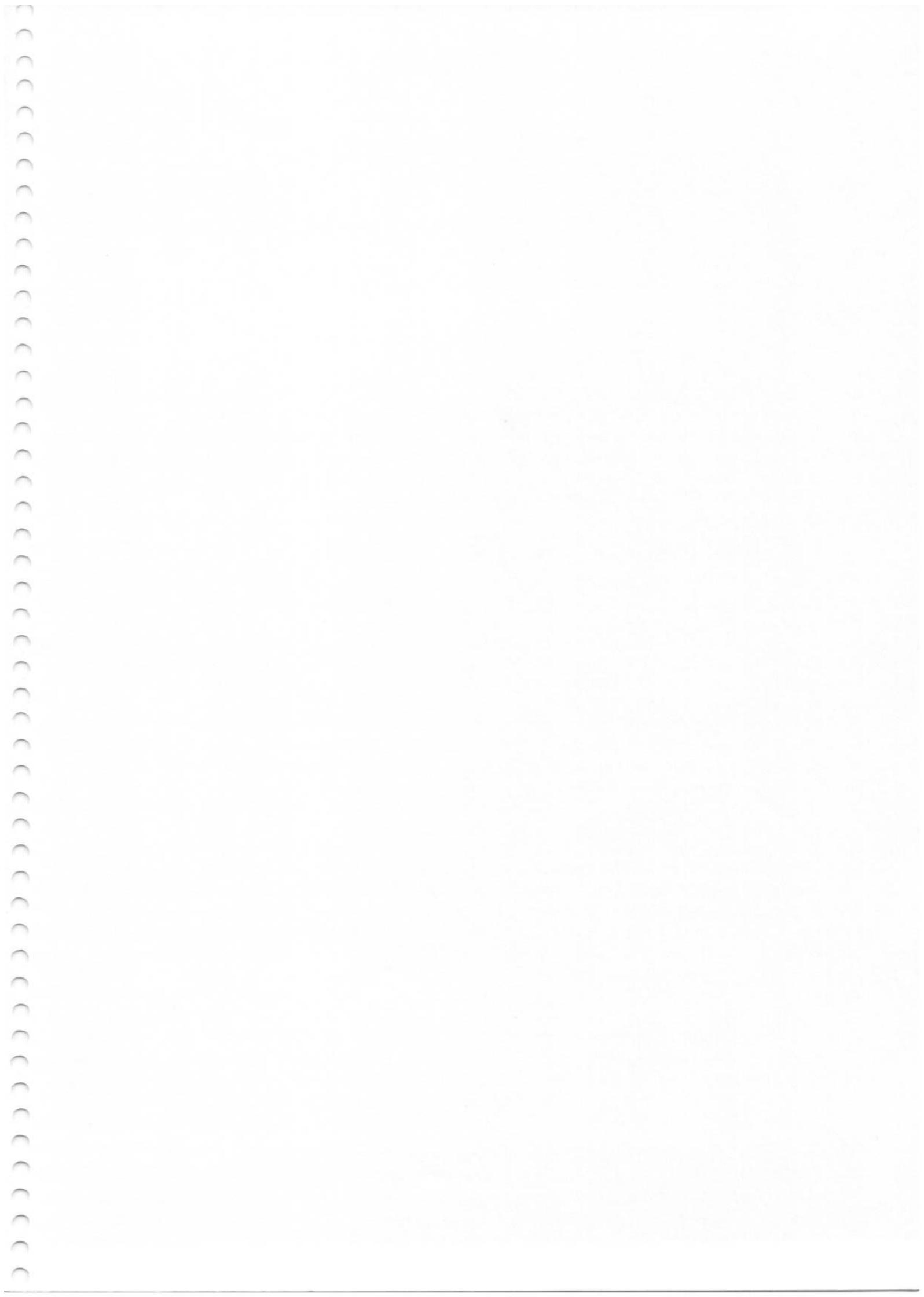
3.3.5. Visão Computacional

A visão processada por computadores possibilita-lhe ver, identificar e entender o que estiver “procurando” (Caulliraux e Alvarenga, 1989). Esse processo pode ser subdividido em várias partes: sensoramento, pré-processamento, segmentação, descrição, reconhecimento e interpretação.

- **Sensoramento:** o processo de aquisição de imagem;
- **Pré-processamento:** serve para a redução de ruído e realce de detalhes;
- **Segmentação:** é o processo de partir a imagem em objetos de interesse;
- **Descrição:** serve para identificar características que são usadas para diferenciar um objeto de outro;
- **Reconhecimento:** processo de identificação de um objeto específico;
- **Interpretação:** atribui um significado especial a um conjunto de objetos que foram reconhecidos.

Cada uma destas partes tem uma complexidade específica, e para distinguir níveis de complexidade devemos dividi-las em três:

- **baixo:** sensoramento e pré-processamento;
- **médio:** segmentação, descrição e reconhecimento;
- **alto:** interpretação.



No sensoramento encontramos problemas de resolução da imagem, técnicas de iluminação, movimentos de câmera e visão digital. Detecção de contornos, de bordas e limiar, descritores geométricos, de Fourier, estatísticos, funções discriminantes estatísticas e manipulação simbólica são problemas encontrados em visão de nível médio e superior.

3.3.6. Sistemas Especialistas

São sistemas projetados para emitir uma decisão ou parecer sobre determinada área do conhecimento humano.

3.3.7. Robótica

Controle de robôs (não relacionado com a construção do robô), explora aspectos que envolvem flexibilidade e adaptabilidade ao ambiente, e capacidade de planejar; portanto, os robôs tornam-se mais interativos com o ambiente.

Os robôs podem ser classificados em função de seu grau de inteligência. Uma máquina é considerada inteligente se possui qualquer uma das seguintes habilidades:

- capacidade de raciocinar e de realizar interferências;
- capacidade de resolver problemas;
- capacidade de acumular e de usar conhecimentos;

- capacidade de planejar as próprias ações e de prever o resultado delas;
- capacidade de aprender, com a experiência, livros ou professores;
- capacidade de enxergar, ouvir e interpretar corretamente estímulos sensoriais.

3.5. IA NO CONTEXTO DA MANUFATURA

3.5.1. Generalidades

Desenvolvimentos em IA tem tido um grande impacto em sistemas de manufatura e todas as áreas do CIM (Computer Integrated Manufacturing) tem sido afetadas pela IA (Kusiak, 1990).

O sistema CIM é conceituado (Eversheim et al., 1986) como um sistema produtivo gerenciado por um sistema computacional em todas as fases, desde a concepção à fabricação do produto, vendas, compras, clientes e administração.

A IA representa uma ferramenta poderosa que muito já contribuiu e contribuirá para a realização do CIM. A razão desta afirmação ser verdadeira, é que as técnicas de IA podem ser aplicadas em todas as áreas de manufatura. Essa técnica assegura um padrão de compartilhamento de informação ou conhecimento entre os vários meios de um ambiente CIM. A maior atividade em IA aplicada à manufatura são os Ses, que podem ser usados em quase todos os ciclos de manufatura, incluindo desenho, projeto, planejamento da produção, gerenciamento de produção e sequenciamento. Um SE tem

também a capacidade de executar diagnósticos de máquinas, processos, e podem ainda ser aplicados para monitoramento e controle de processos (Schaffer, 1986). Para isto há integração das seguintes áreas através de computadores:

- Projeto de peças e produtos;
- Projeto de ferramentas e fixações;
- Planejamento do processo;
- Máquinas de Controle Numérico (CN);
- Planejamento da produção;
- Usinagem;
- Montagem;
- Manutenção;
- Controle de qualidade;
- Inspeção
- Sistemas de manuseio;
- Sistemas de transporte e armazenamento automatizados.

Ainda mais importante que o CIM, tem-se as bases de conhecimento especialistas que tornam-se entidades independentes e portáteis que podem ser acessadas por qualquer outro tipo de SE. Ao contrário dos Sistemas de Banco de Dados (SBD) convencionais, nos quais as informações (procedurais) sobre os dados estão contidas em um particular programa, o conhecimento de um SE será acessado, atualizado e movimentado com mais facilidade entre os Ses que servem para diferentes funções. Desse modo ocorre o compartilhamento de informação, que é essencial para o CIM. A

aplicação de SE na área de fabricação leva à tomada de decisão rápida no gerenciamento de uma indústria.

O Sucesso da aplicação da IA em fábricas está baseada na substituição da base de conhecimento humana especializada da melhor forma possível. Os Ses são os melhores aliados para essa substituição e são incorporados em grande quantidade de sistemas, incluindo máquinas individuais e células (Bellinger, 1988).

Um FMS (Flexible Manufacturing System) (Shaw e Whinston, 1989) é construído como um Sistema Baseado em Conhecimento, o qual consiste de três componentes básicos: uma Base de Dados, uma Base de Conhecimento e uma Máquina de Inferência, sendo que a base de dados armazena conhecimentos declarativos encontrados em um universo generalizado e a base de conhecimento armazena o domínio específico através de conhecimentos procedurais. Este conhecimento modela as ações e é frequentemente representado por regras de produção e operadores lógicos. A máquina de Inferência armazena o controle do conhecimento sobre a estratégia de construção do projeto, indicando como selecionar operadores e como aplicá-los.

O termo FMS (Batocchio, 1991), é empregado para designar a fabricação em pequenos/médios lotes de fabricação através de uma ou mais máquinas interligadas em fluxo de material e informação, podendo automática e simultaneamente fabricar diferentes peças com diferentes seqüências de operações em um sistema.

CAPÍTULO 4

SISTEMAS ESPECIALISTAS (SE)

4.1. CONTEXTO GERAL

A IA e o seu segmento de aplicação denominado “Sistema Especialista” (SE), constituem-se em instrumentos adequados para o tratamento de problemas que são decorrentes da experiência e das preferências pessoais do especialista (Teixeira Jr et al., 1989).

SEs são programas que imitam o comportamento de especialistas humanos. Usam informações que o usuário fornece para emitir uma opinião sobre determinado assunto (Schildt, 1989).

A tarefa de construir um SE se resume a fazer com que os computadores resolvam problemas em que seria necessário a presença de um especialista em determinado assunto (Campos, 1988).

SE (Passos, 1987) é um programa de computador destinado a solucionar problemas em um campo específico do conhecimento, que tem para isso uma base de conhecimento desse domínio restrito. Usa um “raciocínio inferencial” para executar tarefas, e tem desempenho comparável aos especialistas humanos. Na prática, uma das mais importantes características de um SE é a capacidade de explanação. Eles surgiram porque as estratégias de resolução de propósitos gerais da IA eram muito ineficientes na

solução de problemas complexos. Na década de 70, ficou claro para os pesquisadores de IA que para conseguir que seus sistemas resolvessem satisfatoriamente problemas reais, era necessário incorporar-lhes grandes quantidades de conhecimentos sobre o problema. Este fato demandou criação do campo da “Engenharia do Conhecimento” que procura formas de usar conhecimentos de especialistas na solução de problemas complexos.

A verdadeira definição de SE (Barborak et al., 1991) vive constantemente em debate, mas pode ser genericamente descrito como um sistema projetado para simular o conhecimento e raciocínio de um especialista humano, e faz com que o conhecimento fique disponível para outras pessoas de forma útil. Os termos **Sistemas de Conhecimento e Sistemas Baseados em Conhecimento** são frequentemente usados com sinônimos de SEs.

Os benefícios que um SE pode trazer são basicamente (Smart, 1987):

- Sintetizar e conservar conhecimento coletivo;
- Treinamento;
- Determinação de especificações funcionais;
- Assegurar consistência e perfeição em decisões repetitivas;
- Execução de tarefas por leigos;
- Realizar as tomadas de decisão em profundidade;
- Implementação de sistemas fáceis de atualização.

Os SEs utilizam-se de fatos, informações específicas sobre a área de interesse, e heurísticas, que são representadas através de regras práticas que o especialista humano utiliza para chegar a conclusões relevantes em sua área de atuação.

4.2. COMPOSIÇÃO DOS SES

Os SEs são compostos por três partes fundamentais: Base de Conhecimento, Base de Dados e Máquina de Interferência.

4.2.1. Base de Conhecimento

A base de conhecimento (*"Knowledge base"*) é que contém toda a sabedoria de um especialista, isto é, a base de conhecimento é formada pelas regras que descrevem o conhecimento de um especialista. Essa base consiste de descrições, relacionamentos e procedimentos pertinentes a um particular domínio. As **descrições** identificam e diferenciam objetos e classes, e geralmente incluem regras com respeito às suas aplicações. Os **relacionamentos** descrevem as dependências e associações entre as informações na base de conhecimento. Os **procedimentos** especificam o raciocínio das operações que devem ser executadas.

Representação do conhecimento (Schwabe e Carvalho, 1987) é a estrutura formalizada e o conjunto de operações que envolve a descrição, relacionamento e

procedimento de um determinado domínio. O conhecimento representado em um programa particular chama-se **base de conhecimento**.

Para o devido armazenamento do conhecimento (Krause, 1991) existem diferentes representações, entre elas, regras de produção, frames, redes semânticas e expressões lógicas.

- **Regras de produção** são mais adequadas para representação do conhecimento dedutivo, como situação/ação, premissa/conclusão, antecedente/conseqüente e causa/efeito. É o método utilizado pelo *Smart Elements*.

As regras de produção são regras do tipo “*if... then , else*” compostas de condições e ações:

“*if*” [*se*] a(s) seguinte(s) condição(ões) existe(m)

“*then*” [*então*] execute a(s) seguinte(s) ação(ões).

“*else*” [*senão*] as seguintes ações.

Em lógica:

- a porção “*if*” da declaração é chamada de antecedente, que exprime qual condição está sendo provada;
- a porção “*then*” e “*else*” é chamada de conclusão.

- **Frames** são os mais indicados para representar conhecimento descritivo e relacional que reúne ou se ajusta a algum protótipo, tal como a descrição de um ambiente hostil ou processo de contabilização. É uma estrutura de dados que contém conhecimento sobre um conceito. Ligados a cada frame existem vários tipos de informação, sendo que algumas delas são sobre o uso dos frames.
- As **redes semânticas** tem capacidade de representar o conhecimento de forma genérica e flexível, com enfoque para as ligações (relações) entre os conceitos que não seguem uma organização hierárquica (Campos, 1989). Sua estrutura é composta por nós conectados por arcos que representam o relacionamento entre esses nós. Os nós podem representar objetos, conceitos ou situações.
- As **representações orientadas para lógica de predicados** descrevem o conhecimento através de expressões lógicas, que permitem o conhecimento através de expressões lógicas, que permitem deduzir alguma coisa a partir de um conjunto de fatos (premissas) e axiomas (regras gerais de dedução).

De todas estas formas, a primeira (regras de produção) é a mais utilizada em aplicações comerciais atualmente.

Quanto maior for a quantidade de conhecimento contida na base de conhecimento, melhor será o desempenho do SE.

4.2.2. Base de Dados

A base de dados (“*data base*”) contém os fatos e informações relativas ao domínio que está sendo explorado. É uma coleção simples de símbolos usados para refletir um fato, um estado ou uma hipótese, sendo que a interpretação desses símbolos dependem basicamente da natureza da aplicação.

A organização da base de dados pode ser tanto linear como hierárquica e seu tamanho é arbitrário, ela não exige construções. O *Smart Elements* utiliza base de dados de organização hierárquica, sendo o seu projeto baseado em objetos, como mostraremos mais adiante.

4.2.3. Máquina de Inferência

A Máquina de Inferência (“*inference system*”) é o sistema de controle que dirige a implementação do conhecimento. Ela decide quais técnicas de busca heurística são usadas para determinar como as regras na base de conhecimento são aplicadas para o problema. A rotina de busca analisa através de soluções alternativas para proceder de um ponto de partida, ou estado inicial, para um lema (objetivo) ou vice-versa.

Uma Máquina de Inferência é um protocolo de programa para navegar através das regras e dados da representação do conhecimento para resolver o problema, ela concretiza a dedução. Sua tarefa é selecionar, e então aplicar a regra mais apropriada em cada passo da execução do SE, o que contrasta com as técnicas de programação

convencional, onde o programador seleciona a ordem na qual o programa deverá executar os passos, ainda em tempo de programação. Há sistemas que operam a inferência por caminhar para a frente, outros utilizam caminhar retrospectivo e ainda outros empregam ambas as direções. Em muitos casos a escolha de qual direção o sistema deverá executar é feito reproduzindo a maneira utilizada por uma pessoa para resolver o problema. No *Smart Elements*, o caminhar pode ser em ambas as direções.

As Máquinas de Inferência possuem três funções básicas:

- **Identificação das regras de aplicação:** todas as regras devem estar “alertas” para ver se alguma delas pode ser aplicada para o problema corrente e manuseá-la. No *Smart Elements*, as regras são distribuídas em posições hierárquicas bem definidas, de forma que num determinado instante, somente as regras de mesma posição estão sendo executadas. As regras de posição inferior somente terão início após a conclusão das regras superiores.
- **Resolução de conflitos:** a Máquina de Inferência deve decidir qual regra deve ser executada quando estiver ocorrendo um conflito. O *Smart Elements* possui um dispositivo para este caso que é o indicador de prioridades, assim se houver conflitos mesmo entre as prioridades estabelecidas, a decisão fica ao critério da ordem de execução das regras.
- **Execução da regra:** a regra selecionada é avaliada e sua ação executada.

Estas três situações são continuamente aplicadas pelas regras disponíveis até que não haja mais regras “candidatas” para serem executadas. Basicamente as Máquinas de Inferência imitam os tipos de pensamento que empregamos quando tentamos resolver algum problema.

“Rule Chaining”, refere-se como a Máquina de Inferência determina quais regras serão aplicáveis (não é uma resolução de conflito) baseando-se em quais regras já foram aplicadas. O termo “chaining” refere-se a juntar as regras como engenho de busca para inferir uma solução.

As técnicas de busca para construir uma Máquina de Inferência aqui citadas, são “forward chaining” e “backward chaining”. No *Smart Elements*, ambas encontram-se implicitamente implementadas para uso.

“Forward Chaining” (ou encadeamento para a frente ou encadeamento direto) é uma técnica de busca onde a Máquina de Inferência parte de um estado inicial (informações que o usuário fornece), ou qualquer ponto intermediário da árvore de decisões, e trabalha em direção ao lema (objetivo), utilizando-se para isso de mudanças de estado, isto é, movimentos por meio de uma rede de e/ou lógicos. Suas características básicas são:

- Tentar descobrir novos fatos baseados nos fatos conhecidos;
- Receber todas as informações (dados) antes do início do processamento;
- Ser dirigida por esses dados;
- Apresentar pouca interação com o usuário.

“Backward chaining” (ou **encadeamento reverso**) é um procedimento de inferência que trabalha a partir do lema ou conclusão, ou de qualquer parte entre o início e fim da árvore de decisões, para ver se as condições que o tornariam verdadeiras são satisfatórias, isto é procura provar a meta pela prova de submetas Suas características básicas são:

- Tentar descobrir um objetivo específico;
- Interagir com o usuário durante o processamento;
- Ser dirigida por objetivos.

4.3. ALGUMAS ÁREAS DE APLICAÇÃO DE SES

4.3.1. Em Manufatura (Smart, 1987)

- Engenharia de Projeto;
- Planejamento do Processo;
- Ordem de Entrada;
- Configuração do Produto;
- Compartilhamento de Chão de Fábrica;
- Monitoramento;
- Controle de Qualidade;
- Análise e Produtividade de Fábrica;
- Interpretação;
- Diagnósticos;

- Desenho, Predição, Depuramento, Reparos;
- Sequenciamentos;
- Aprendizado.

Schaffer diz que as principais áreas de aplicação de SE em manufatura são planejamento de processos, diagnóstico e sequenciamento; sendo que um dos fatores que mais influenciam a utilização de técnicas de IA em manufatura é o rápido aumento de complexidade, isto é, a complexidade da área aumenta mais rapidamente que o desenvolvimento e treinamento de experientes engenheiros mecânicos e projetistas.

Sistemas CAPP (Computer Aided Process Planning) tem conseguido capturar com grande facilidade o gerenciamento do conhecimento de planejamento de processos, e como exemplo disto, pode-se citar o SE desenvolvido pela *Avionics Division of Honeywell Corporation*, que trabalha com planejamento de processo generativo (Marks, 1988).

A utilização de SE em manufatura (Pham e Oztemel, 1992) podem reduzir custos de treinamento, erros de produção, taxa de refugo e a necessidade de peritos humanos.

Com relação à manufatura auxiliada por computador, o processamento de conhecimento é pré-requisito necessário para maiores aperfeiçoamentos. Os sistemas baseados em conhecimento podem cooperar com base em domínios de conhecimentos múltiplos e experiências (Krause, 1991).

4.4. PRINCIPAIS TIPOS DE SES (PASSOS, 1989)

4.4.1. Interpretação

Interpretam e explicam certas situações através de observações de fatos, isto é, fazem a análise de dados e procuram determinar as relações e seus significados.

4.4.2. Previsão

Inferem conseqüências prováveis de situações dadas tais como, previsões demográficas, de tempo, de tráfego, entre outras.

Basicamente, este tipo de sistema tem a capacidade de “previsão do futuro”, isto a partir de uma modelagem de dados do passado e do presente. Como baseia sua solução na análise do comportamento dos dados recebidos, ele deve ter um mecanismo para criticar os vários “futuros” possíveis através de raciocínios hipotéticos.

4.4.3. Diagnose

Inferem sobre o mal funcionamento de determinadas funções, irregularidades, causa e efeito.

4.4.4. Planejamento

Programa de ações a serem tomadas para se chegar a um objetivo. São estabelecidas etapas e sub-etapas com suas prioridades definidas.

4.4.5. Análise de Desempenho

Executa comparações entre o desempenho atual com o desempenho desejado.

4.4.6. Treinamento

Tem a habilidade de explicar sua linha de raciocínio ao usuário.

Exemplos: STREAMER, Sistemas de Treinamento para Estudantes de Medicina.

Muitas áreas de engenharia podem conseguir consideráveis benefícios a partir do desenvolvimento e utilização de SEs e se aplicam em:

- **Interpretação de dados:** Dados, como os vários parâmetros de produção, podem ser usados para apontar gargalos ou áreas problemáticas nos setores produtivos.
- **Diagnóstico:** Podem ser desenvolvidos sistemas que auxiliem na análise de defeitos em peças, defeitos em máquinas, etc.

- **Monitoramento:** É possível o desenvolvimento de programas que monitorem e sugiram medidas corretivas quando necessário. Esses sistemas devem interpretar as observações de sinais sobre o comportamento monitorado. Devem verificar de maneira contínua um determinado comportamento com limites preestabelecidos, sinalizando quando forem requeridas intervenções para o sucesso da execução. Tem mecanismos que permitem tratar dados errados, distorcidos ou até mesmo ausentes.
- **Planejamento:** A determinação de fluxos operacionais ainda requer considerável experiência de chefes da área operacional e executivos. Com base em poucas regras estabelecidas por um especialista em fluxo, é possível facilitar o trabalho de planejamento em determinada área. Também utilizado para robôs e programação automática.
- **Projeto:** O projeto de layout de uma determinada operação, tempos e métodos e outras coisas tornam-se um tanto trabalhosas para microcomputadores. Ses podem exercer um papel destacado nesses projetos.
- **Previsão:** Programas de computador que podem ser escritos para se prever as tendências e estabelecer previsões das diversas necessidades.

4.5. CARACTERÍSTICAS DE UM SE

4.5.1. Flexibilidade

Um SE pode crescer ativamente pela adição de mais conhecimento na forma de regras. Além disso, estas regras podem ser adicionadas pelo especialista sem nenhum conhecimento de computação.

4.5.2. Adaptabilidade

Como as questões podem ser formuladas pela mudança do SE, novas regras devem ser adicionadas. Com esta habilidade para adaptar novas situações, a vida do SE pode ser estendida indefinidamente, sendo que os custos de desenvolvimento após o estágio inicial podem ser reduzidos.

4.5.3. Desempenho e Eficiência

Bom desempenho e eficiência para encontrar as soluções.

4.5.4. Explicação do Raciocínio

A fim de tornar o programa auto explicativo, no que concerne ao raciocínio empregado, são respondidas ao usuário algumas perguntas elucidativas. Este trabalho é

executado por um módulo chamado justificador. Na implementação do sistema essas perguntas podem ser feitas para responder perguntas fundamentais, tais como: “Como?”; “Por quê?”; “Por que não?”.

Exemplo:

Como a máquina de inferência chegou a determinada conclusão?

Por que da necessidade de fornecermos esse novo dado?

Por que não foi usada determinada regra?

4.5.5. Interação com o usuário

Os sistemas tem boa interação com o usuário, pois tem características que auxiliam o usuário amplamente. Alguns têm separadores de sílabas e outros fazem correção dos erros mais comuns da linguagem usada, outros, a facilidade de perguntar, isto é, questionar o usuário, a fim de chegar à meta mais rapidamente e com um grau de certeza maior.

4.5.6. Incerteza

Muitos SEs podem trabalhar com a incerteza, isto é, pode existir uma resposta com uma determinada chance percentual de ser verdadeira. Isto é, expressam implicitamente o grau de confiança que se tem no fato de uma resposta ser verdadeira.

Para isso, cada variável de um SE deve possuir associada a ela um fator de certeza que pode variar de $[-1,1]$.

4.6. FASES PRINCIPAIS DE DESENVOLVIMENTO DE UM SE

O processo de construção de um SE é frequentemente chamado de “Engenharia do Conhecimento”, tipicamente ela envolve uma forma especial de interação entre o construtor do SE, chamado Engenheiro do Conhecimento, e um ou mais especialistas humanos de alguma área.

O Engenheiro de Conhecimento “extraí” dos especialistas humanos seus procedimentos, estratégias e regras práticas para solução dos problemas “construindo” este conhecimento num SE.

O Engenheiro do Conhecimento pratica a arte de buscar os princípios e ferramentas que requerem o conhecimento de especialistas para suas soluções.

As questões técnicas na aquisição desse conhecimento, na representação, e na utilização adequada na construção e explicação das linhas de raciocínio são problemas importantes no projeto de Sistemas Baseados em Conhecimento.

1a. fase: envolve a identificação e conceituação do problema.

A **identificação** inclui a seleção e a aquisição de um especialista, fontes de conhecimento e outros recursos, e ainda a definição clara do problema.

A **conceituação** inclui a descoberta dos conceitos centrais e das relações necessárias à caracterização do problema.

2a. fase: lida com a **formalização, implementação e teste** de uma arquitetura apropriada para o sistema, incluindo constantes reformulações de conceito, reprojeto de representações e refinamento do sistema implementado.

A **revisão** resulta das críticas do especialista e sugestões para aperfeiçoamento do sistema.

4.7. CONHECIMENTO HUMANO X ARTIFICIAL

CONHECIMENTO HUMANO

- Percível
- Difícil de transferir
- Difícil de documentar
- Imprevisível
- Caro
- Discriminatório
- Individualizado

CONHECIMENTO ARTIFICIAL

- Permanente
- Fácil de transferir
- Fácil de documentar
- Consistente
- Razoável
- Imparcial
- Social

- Criativo
- Adaptável
- Enfoque amplo
- Baseado em senso comum
- Sem inspiração
- Inflexível
- Enfoque restrito
- Técnico

Tabela 2 _Comparação entre Conhecimento Humano e Artificial

Quando dizemos que um sistema é sem inspiração estamos dizendo que há falta de criatividade. Um perito pode reorganizar informações e usá-las para sintetizar novo conhecimento; pode manusear eventos inesperados usando imaginação ou novas abordagens, inclusive raciocinando por analogia de um outro domínio completamente diferente. SEs trabalham sem inspiração, de forma rotineira.

Os seres humanos -peritos ou não- possuem o conhecimento advindo do senso comum, que se constitui de um largo espectro de conhecimento sobre o mundo, acumulado durante toda a sua vida e que permeia todas as suas decisões, isto é, fatos que as pessoas conseguem discernir com facilidade, como por exemplo uma pessoa de 25 anos com 7 kg. Esse fato só seria observado por um SE que tivesse na sua base de conhecimento tal restrição.

Embora SEs e peritos reais possam em alguns casos desempenhar tarefas idênticas, as características de ambos são criticamente diversas. Mesmo havendo algumas vantagens evidentes dos SEs, eles não poderão substituir os peritos em todas as situações devido a algumas limitações.

SEs trabalham com a heurística, isto é, utilizam-se de experiências anteriores nas soluções de problemas análogos. Não são meramente aplicadores das regras de produção, onde estão representados os conhecimentos da área específica, eles tem que ter experiência anterior, intuição e criação. Às vezes esse conhecimento resolve um problema rapidamente, mas também pode falhar e logo outro conhecimento será tentado, esta é a técnica de tentativa e erro (heurística) usada na resolução de problemas. Isto não acontece quando se resolve um problema usando programação convencional, onde um único algoritmo é programado para resolver um determinado programa, não sendo necessário pesquisar o espaço das soluções possíveis, pois os passos da solução do problema estão explícitos nos algoritmos.

SEs são dirigidos por dados e não por procedimentos, ou seja, usam programação lógica que enfatizam a estrutura lógica de um problema, isto é, os dados do problema geram um conjunto finito de sentenças que descrevem tal problema ou situação (programação declarativa); é enfatizada a estrutura lógica de um problema e não a contração de um procedimento para resolvê-lo (programação procedimental) como na programação convencional.

4.8. ARQUITETURA DE UM SISTEMA ESPECIALISTA

Com base nas definições anteriores, Schaffer, 1986) propôs a arquitetura da Figura 4.3 a um SE, que é fundamentalmente composto por:

- Uma **Base de Conhecimento**, que contém a modelagem do conhecimento e, em alguns casos, heurísticas para manipular este conhecimento.
- Uma **Base de Dados**, que constitui a área de trabalho do sistema em questão, isto é, contém os dados referentes à manipulação do sistema.
- Uma **Máquina de Inferência**, que processa a Base de Conhecimento e a Base de Dados, usando uma linha de raciocínio, a fim de propor alguma solução para o problema que está sendo analisado.
- Um **Subsistema de Explicação** (“Explanation Facility”), que tem como responsabilidade explicar ao usuário como a Máquina de Inferência chega a certas conclusões, ou por que faz certas perguntas.
- Uma **Interface de Linguagem Natural**, que é responsável pela comunicação usuário/máquina. Esta interface fará as fornecidas, sendo que estas respostas serão utilizadas pela Máquina de Inferência para inferir novas asserções.

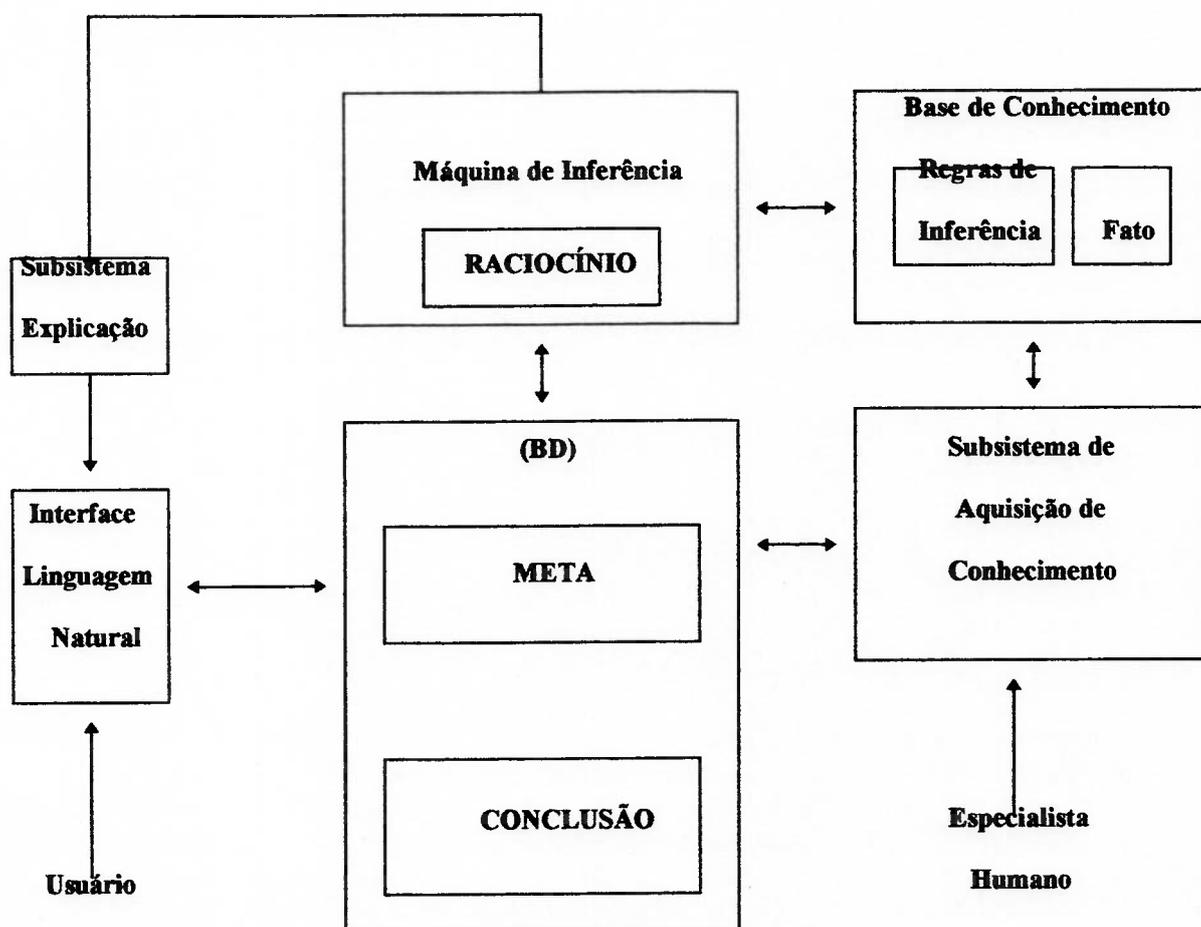


Figura 2 Arquitetura de um SE (Schaffer, 1986)

- Um **Subsistema de Aquisição de Conhecimento** (“Knowledge Aquisition Facility”), utilizado pelo especialista para desenvolvimento do sistema.

Esse subsistema tem que ser capaz de interagir com o especialista não apenas para receber o conhecimento, mas também fornecer/solicitar informações sobre os conceitos básicos que estão sendo usados ou que são novos para o desenvolvimento do sistema.

4.9. SISTEMAS ESPECIALISTAS NO CONTEXTO DA MANUFATURA

Na manufatura, sistemas que utilizam a técnica “*forward chaining*” trabalham com pedaços de informações elementares, tais como uma lista de inventário, que tenta combinar os elementos, até alcançar a meta, que pode ser, por exemplo, um modelo de produto que satisfizesse as especificações dadas. Esse tipo de técnica é particularmente usual em sistemas construtivos que visam a síntese, como é comum em manufatura.

E, no “*backward chaining*”, ocorre a hipotetização de uma conclusão; é entretanto, o mais apropriado para diagnosticar tarefas, nos quais a meta é representada pelas condições falhas e o sistema deduz as razões básicas para as condições falhas.

Quanto aos “*rule-based system*”, que compreendem um conjunto de “regras de produção” que podem representar a natureza dinâmica da aplicação, se encaixam perfeitamente a muitos problemas de manufatura.

CAPÍTULO 5

SISTEMAS ESPECIALISTAS PARA DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE USINAGEM (SEDCU)

5.1. GENERALIDADES

O domínio em sistemas de produção e manufatura (Eloranta, 1990) é obviamente vasto, além do que, os problemas a serem solucionados tem um certo nível de abstração, portanto é conveniente a utilização de sistemas inteligentes. O SEDCU pode ser considerado de alta complexidade, o que é visto como (Forbellonee Eberspuchen, 1993) sinônimo de variedade, o que por sua vez representa a quantidade de situações diferentes que um problema pode apresentar, e deve ter previsão de solução.

O SEDCU teve as seguintes etapas em seu desenvolvimento (Figura 3):

Na **fase inicial (1)**, a definição do problema e do cenário de aplicação, envolveu o entendimento do problema das condições de usinagem, a identificação de suas características, esboço dos objetivos requeridos e definição da metodologia a ser seguida para solucionar esse problema. Esta fase é importante para as definições que serão tomadas nas fases seguinte, inclusive prevendo futuros acréscimos do sistema. A falta de uma avaliação adequada nesta fase implica em restrições na implementação de melhorias ou modificações. Assim temos:

- **Definição do problema** : consiste em determinar parâmetros de usinagem para um dado sistema de fabricação formado por peça, ferramenta e máquina, sendo que, a velocidade de corte será otimizada através da metodologia desenvolvida por Pallerosi e Coppini (Pallerosi e Coppini 1975); o avanço e profundidade de corte baseados em considerações restritivas do sistema (Diniz, 1989).
- **Cenário de aplicação** : o presente trabalho aplica-se em ambientes que reünam as seguintes características conjunta ou parcialmente : (a) o lote de peças é grande o suficiente para obter-se os lotes de provas necessários ao experimento, ou lotes de grande intermitência com quantidade suficiente de peças para gastar uma aresta de corte dentro do critério de vida estabelecido; (b) o principal fator limitante não é a potência ou a rotação máxima do fuso da máquina; (c) há uniformidade nos parâmetros de entrada relativos às peças, ferramentas e máquinas.

No **estudo da viabilidade** (2), foi verificado que o conhecimento do especialista em usinagem tinha um grau de complexidade relativamente alto; necessidade de busca heurística; dificuldade em formalizar as regras, que diversas soluções poderiam ser obtidas para o mesmo problema com a mesma eficácia (ou seja, dentro de uma pequena faixa de tolerância de resultados). Enquanto que, a busca da solução ótima seria difícil, custosa e desnecessária, pois diversos elementos de entrada variam sem critérios confiáveis e mesmo aleatórios, assim concluiu-se que realmente seria necessário, e mais viável, empregar técnicas de IA para o desenvolvimento do sistema.

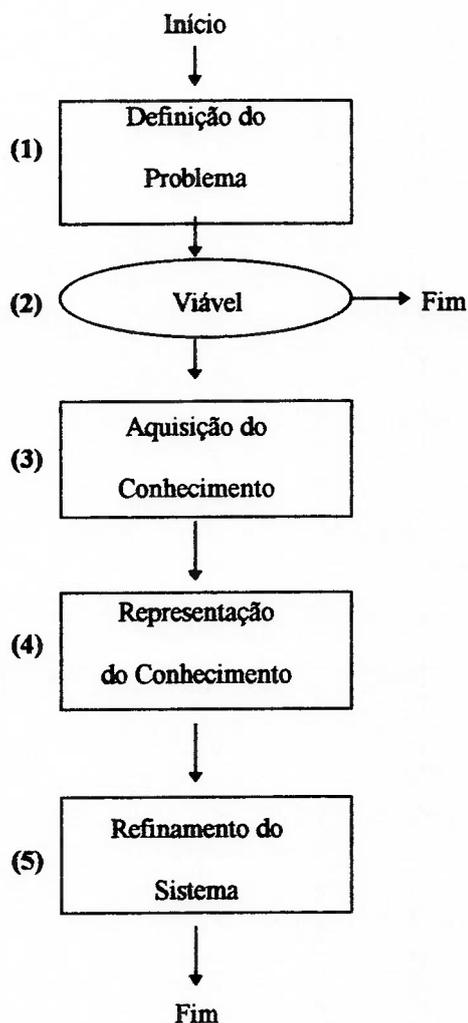


Figura 3. Etapas de Desenvolvimento do SEDCU

Na fase de **aquisição de conhecimento (3)**, o especialista em usinagem repassou fatos e idéias adquiridos durante sua vida, seus estudos, suas observações e ensaios, assim como tabelas e manuais de usinagem de fabricantes e laboratórios. Este conhecimento adquirido é, então, ordenado na forma de **fatos e regras**.

A **representação do conhecimento (4)** de usinagem adquirido na fase anterior, foi implementado através do *software Smart Elements* que é uma ferramenta apropriada

e sofisticada para a solução dos problemas encontrados na programação e aplicação das técnicas mais modernas em IA, ou seja:

- implementação do banco de dados através de projeto baseado em objeto;
- implementação da máquina de inferência pelo mesmo sistema;
- interface através de ambiente *windows* .

O sistema é considerado de tamanho médio, como a maioria dos SEs desenvolvidos para PC, podendo chegar facilmente a um sistema de tamanho grande através da implementação de algumas funções, como veremos adiante. Barborak (Barborak, 1991) define o tamanho de um SE que trabalha com regras de produção, através do seguinte critério:

<u>TAMANHO DO SISTEMA</u>	<u>NÚMERO DE REGRAS</u>
Pequeno	10 - 200
Médio	200 - 500
Grande	acima de 500

Tabela 3 Definição do Tamanho de um SE

5.2. ARQUITETURA DO SEDCU

As figuras abaixo, Figura 4 e 5, mostram a arquitetura do SEDCU, para sistemas automáticos e semi-automáticos respectivamente.

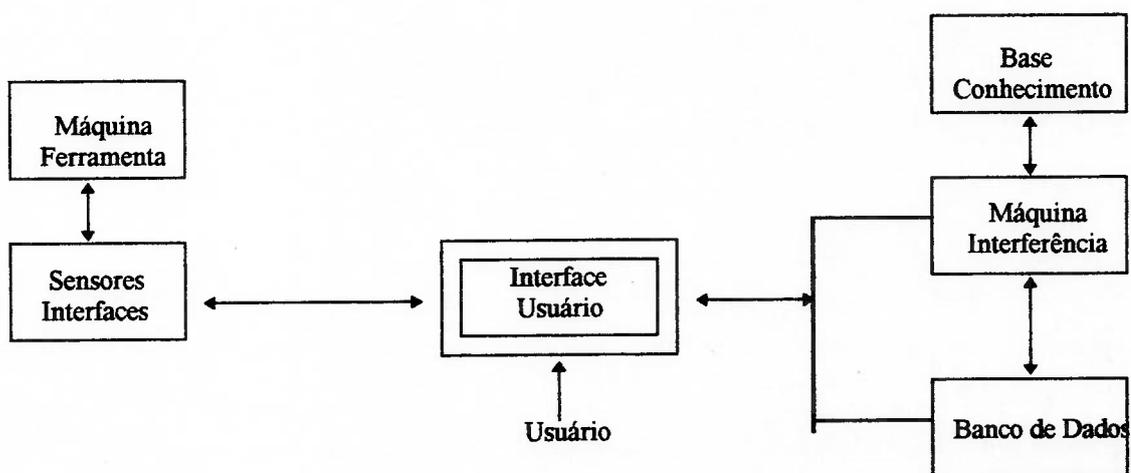


Figura 4 Arquitetura do SEDCU para Sistemas Automáticos

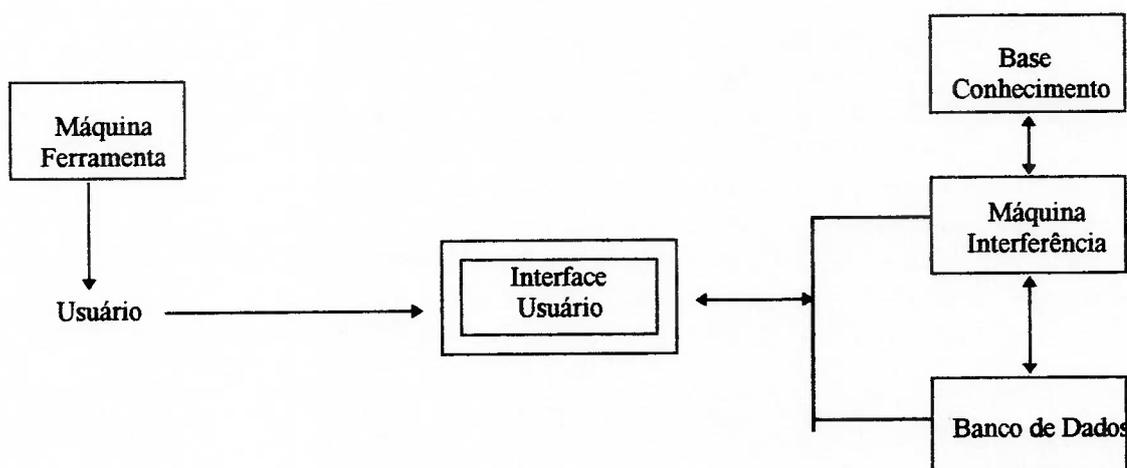


Figura 5 Arquitetura do SEDCU para Sistemas Semi-Automáticos

5.3. AUTOMATIZAÇÃO DO SISTEMA

Com a finalidade de otimizar as condições operacionais, o SEDCU pode ser aplicado tanto a nível de semi-automação como para automação plena, desde que ocorra monitoramento do processo através de sensores que meçam as condições limítrofes do processo.

Para sistemas semi-automáticos a operação da máquina é feita através de programação CNC, havendo necessidade da contagem do número de peças, mudanças de rotação e/ou critério de vida executados pelo usuário. A introdução dos dados coletados e a retirada dos valores otimizados são feitos pelo usuário através do computador. Portanto, esse sistema interage com o usuário sempre que necessitar da alimentação de novas informações (dados) para prosseguir com sua tarefa, ou da tomada de decisão por parte do usuário.

5.4 BANCOS DE DADOS (FATOS)

Os Bancos de Dados contém informações referentes a peças (com aplicação de princípios de tecnologia de grupo), ferramenta, máquina-ferramenta, e materiais. Além disso, conta com um banco de dados para armazenar resultados intermediários de parâmetros de usinagem num determinado estudo de processo.

O *Smart Elements (SEL)* aplica técnicas de programação baseada em objetos (*OOP object oriented programming*) para o desenvolvimento de banco de dados. Tal técnica está baseada na formação de uma rede tipo **Classes & Objetos** entrelaçadas por

relações apropriadamente definíveis. Existe vantagens significativas no uso do OOP para o desenvolvimento de bancos de dados : melhoria da produtividade, aumento da qualidade e elevação da manutenibilidade, etc. Para melhor entender esta técnica vamos começar pela terminologia e conceitos básicos (Coad e Yourdon, 1993).

- **Objeto** : uma abstração de alguma coisa no domínio do problema ou em sua implementação, refletindo a capacidade de um sistema para manter informações sobre ela, interagir com a mesma, ou ambos : um encapsulamento de valores de atributos e seus serviços exclusivos. O símbolo objeto usado pelo *SEL* : \triangle
- **Classe** : Uma descrição de um ou mais **Objetos**, através de um conjunto uniforme de **Atributos e Serviços** ; além disso, pode conter uma descrição de como criar novos **Objetos** na classe. O símbolo classe usado pelo *SEL* : \bigcirc
- **Classe & Objeto** : um termo que significa “ uma Classe e os Objetos nessa Classe “ .
- **Atributos** : é algum dado (informação de estado) para o qual cada Objeto em uma Classe, ou Subclasse, tem o seu próprio valor. O símbolo atributo usado pelo *SEL* : \square
- **Serviços** : é um comportamento específico por cuja exibição um Objeto é responsável. O símbolo atributo usado pelo *SEL* : **SERVICOS**

- **Estrutura** : o *Smart Elements* utiliza do tipo **Generalização-Especialização**, ou seja, à esquerda são apresentadas **Classes de Generalizações** e **Classes de Especializações** indo-se para a direita, com linhas desenhadas entre elas. As Classes de Especializações são, também, chamadas de **Subclasses**.

A figura 6 mostra uma estrutura tipo Generalização-Especialização usando a simbologia empregada pelo *Smart Elements* na sua construção gráfica.

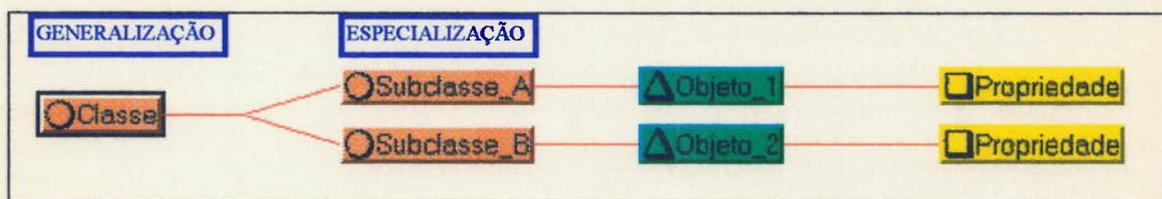


Figura 6 - Estrutura baseada em Classes & Objetos - *Smart Elements*.

5.5. BANCO DE DADOS DE PEÇAS

O banco de dados de peças tem a função principal de armazenar informações específicas de peças já estudadas, e todos os parâmetros de usinagem utilizados, com o objetivo de recuperar condições de operação aprovadas na prática ou aproveitar parte dessas informações na solução de novos problemas. Com esse fim, um **atributo** foi criado com a função de fazer a identificação de semelhança entre elementos usando conceitos de **Tecnologia de Grupo** aplicando-se o **Sistema Opitz** de classificação de

peças (Novaski e Duque Santa, 1986). É interessante observar que operações unitárias podem ser cadastradas e, assim, para a definição de parâmetros de uma determinada peça ainda não definida, estas informações podem ser agrupadas com o objetivo de definir o perfil da operação para a nova peça. A figura 7 mostra a estrutura deste arquivo.

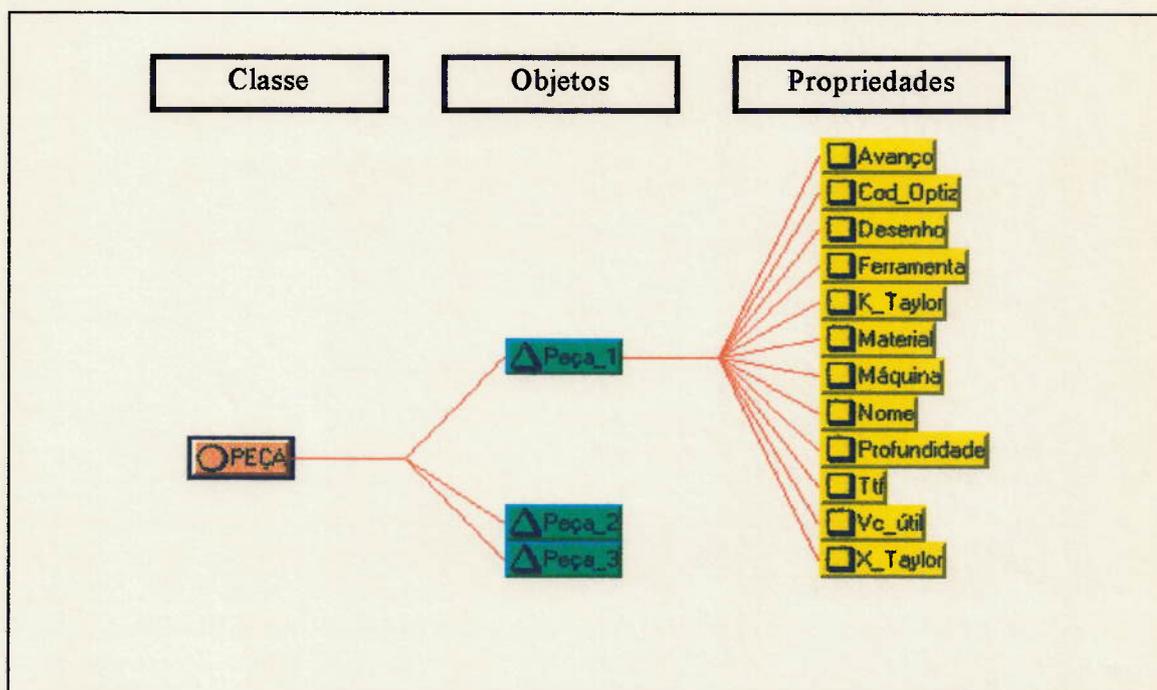


Figura 7 - Banco de Dados de Peça

5.6. BANCO DE DADOS DE FERRAMENTAS

Este trabalho não contempla a seleção automática de ferramentas. Neste caso, a mesma deverá ser definida durante a elaboração do processo, assim como deverá, previamente, ser definido um critério de fim de vida para a mesma. em trabalhos futuros,

este módulo poderá ser ampliado com facilidade, aplicando-se algum critério para a seleção automática de ferramentas. De qualquer forma, a tendência atual na pesquisa sobre o assunto é no sentido de reduzir o número de diferentes tipos de ferramentas em estoque com a implementação de um conjunto de *ferramentas-padrão*. Assim sendo, o problema de escolha de ferramentas fica reduzido à escolher aquela mais adequada a uma determinada geometria de peça.

Este banco de dados foi implementado em diversos níveis de **especializações**, ou **subclasses**, com o objetivo de facilitar a escolha de uma ferramenta devido ao grande número de elementos disponíveis no mercado. As figuras 8 e 9 mostram a estrutura montada para tal.

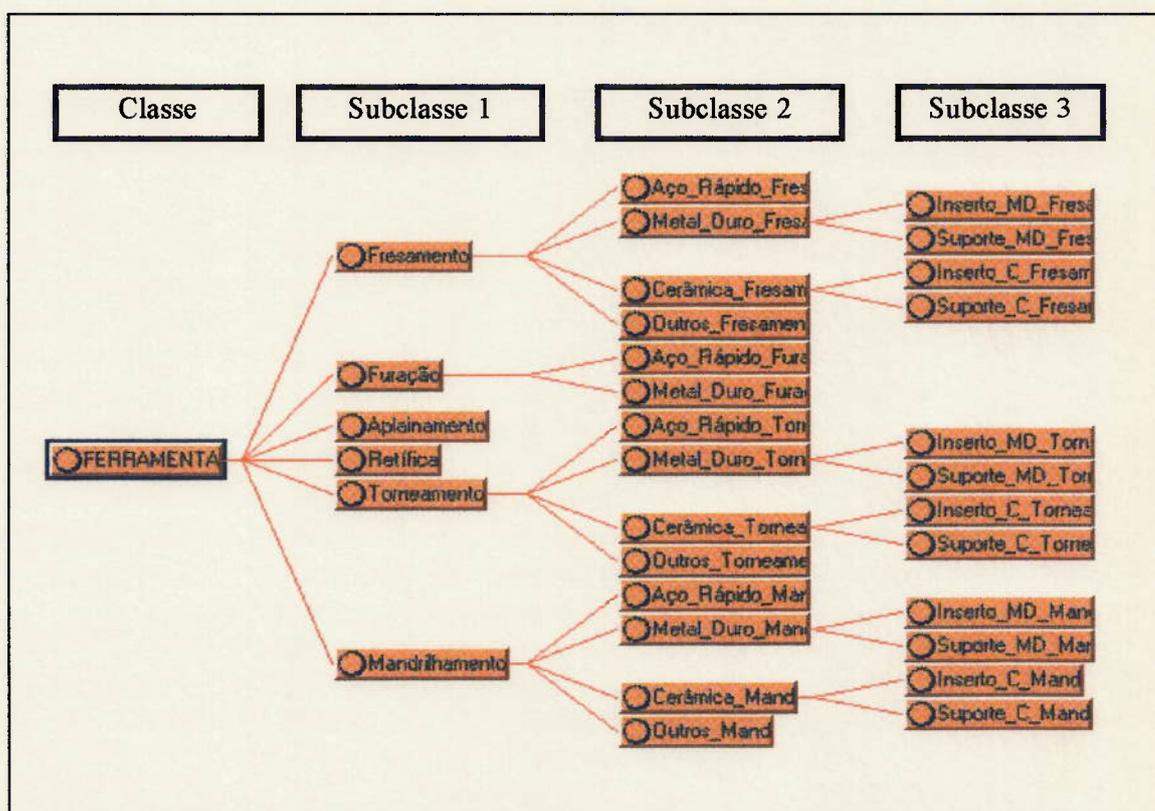


Figura 8 - Banco de Dados de Ferramenta - Classe e Subclasses

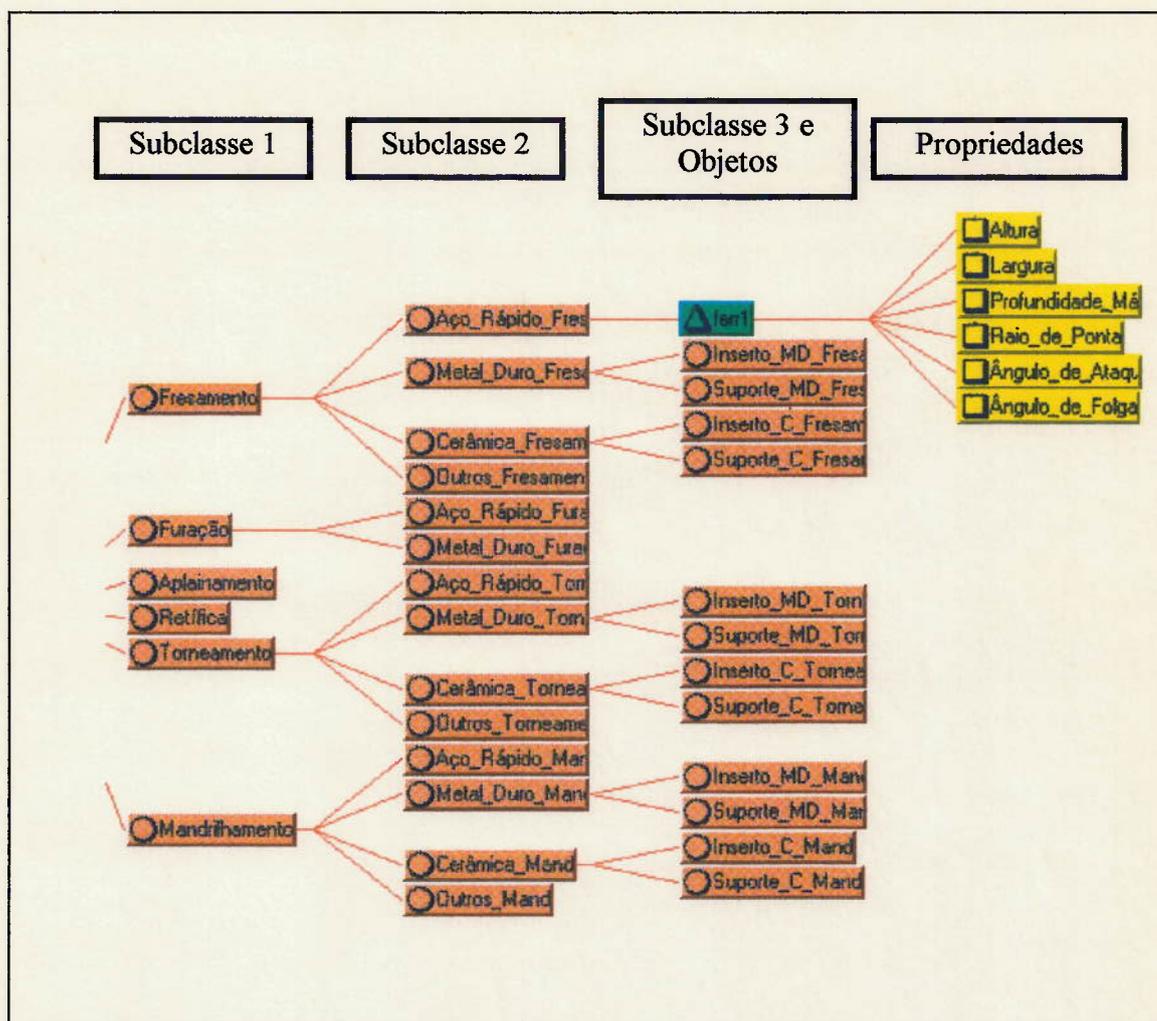


Figura 9 - Banco de Dados de Ferramenta - Classe & Objetos

5.7. BANCO DE DADOS DE MÁQUINAS FERRAMENTAS

Este banco de dados não seleciona a máquina a usar; esta operação deve ser feita pelo usuário na hora de planejar o processo produtivo, porém uma vez selecionada a máquina, as propriedades ali encontradas servirão de subsídios no processo para a determinação dos parâmetros desejados. Estas propriedades poderão ser alteradas com o

fim de estabelecer restrições que o sistema venha a impor. A figura 10 mostra a estrutura montada neste caso.

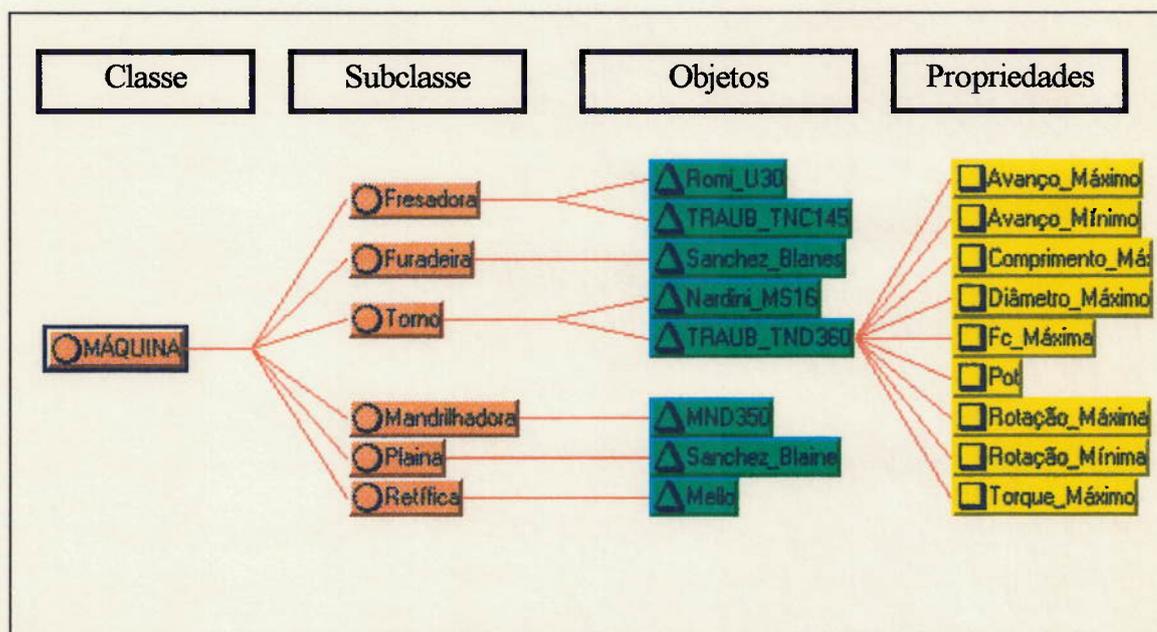


Figura 10 - Banco de Dados de Máquina

5.8. BANCO DE DADOS DE MATERIAIS

O banco de dados de materiais foi implementado em vários níveis de especialização, ou subclasses, com o objetivo de facilitar a identificação do material. Além disso, está estruturado para receber informações (propriedades) que possam ser significativas na solução do problema, tais como : identificação do fabricante, com o objetivo de observar possíveis e comuns variações nas propriedades de um mesmo material normalizado.

Outro ponto observado é que alguns parâmetros (x e k de Taylor), variam em função do conjunto operação-ferramenta-máquina-dispositivo, etc, além de obviamente variarem em função da procedência da informação : catálogo, laboratório ou condições reais de operação. Neste caso, existe um intervalo de confiabilidade associado a cada parâmetro em função desta procedência. As informações de catálogos são menos confiáveis, porém, abundantes, e as informações de condições reais são mais confiáveis, porém escassas.

Assim, foi implementado um dispositivo lógico para selecionar a informação disponível mais confiável. As figuras 11 e 12 mostram a estrutura de implementação desse banco de dados.

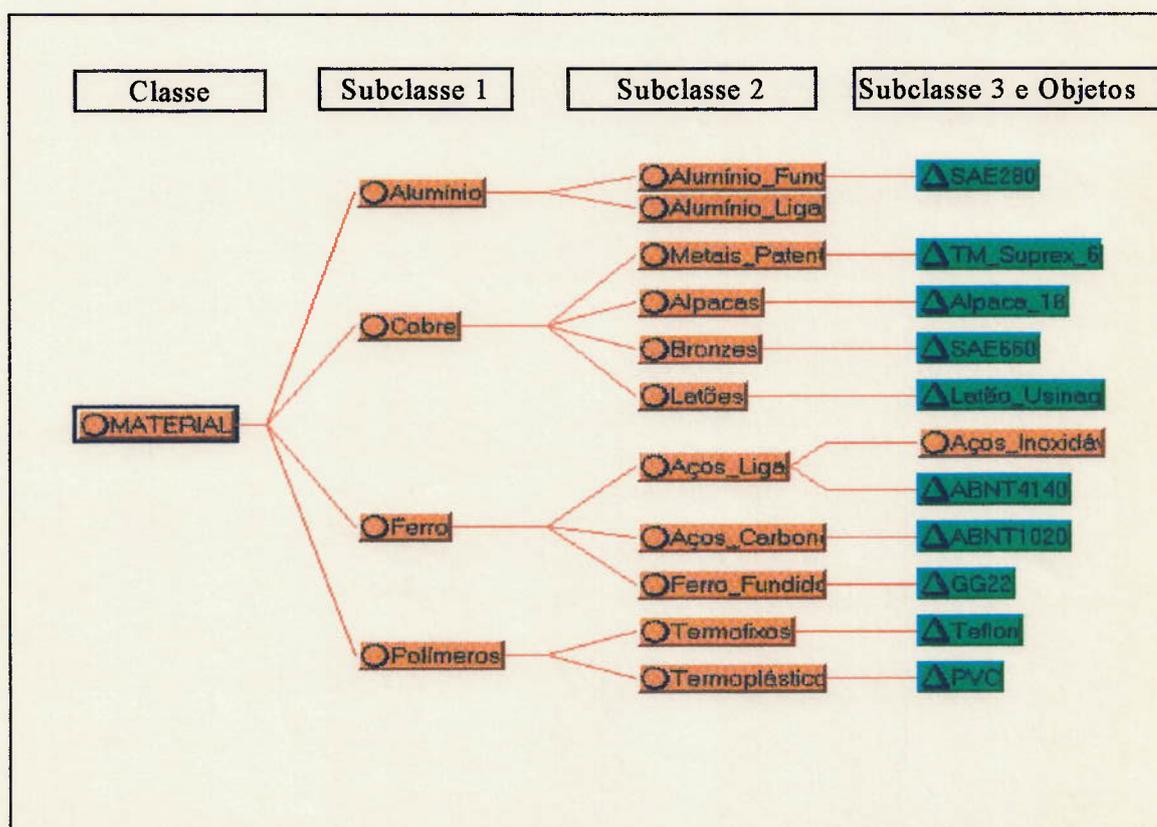


Figura 11 - Banco de Dados de Materiais

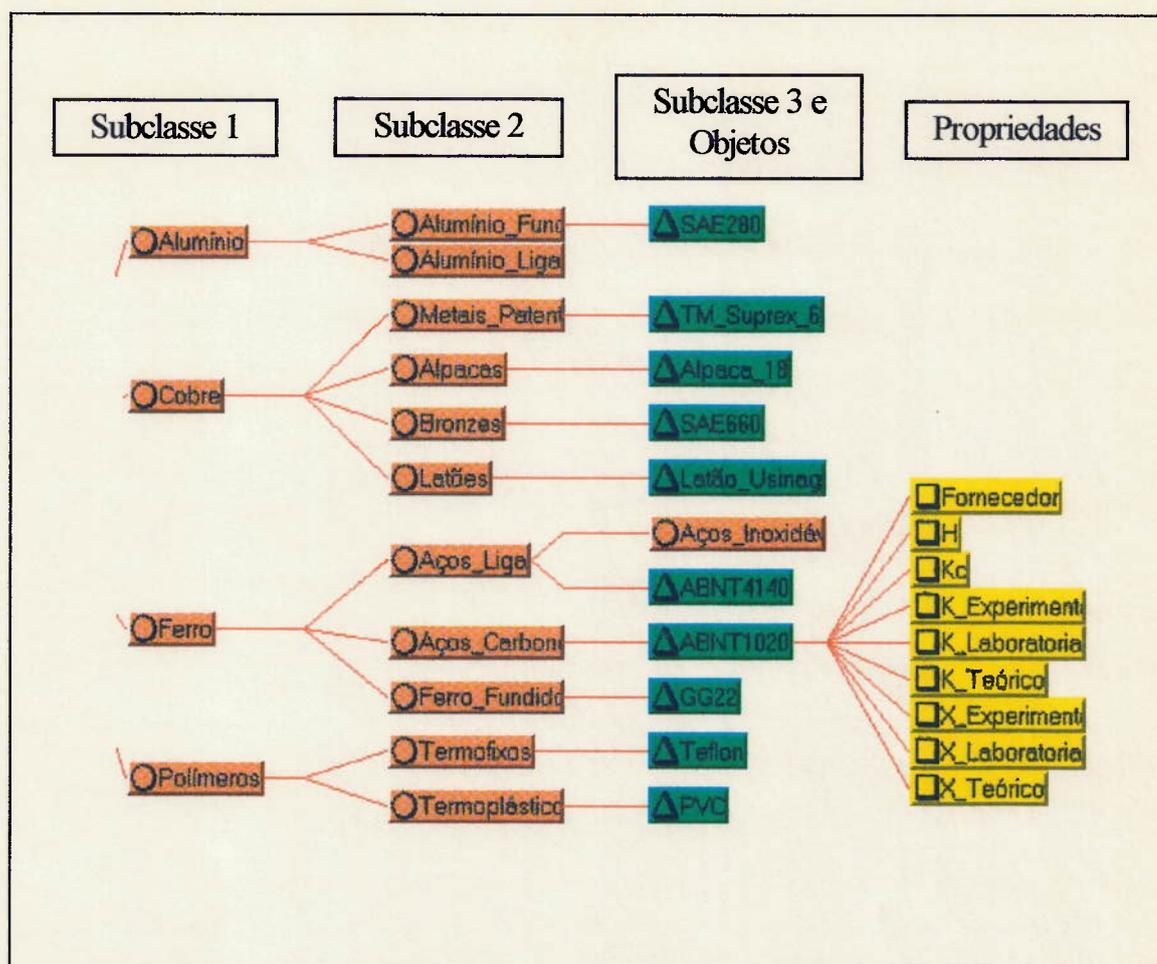


Figura 12 Banco de Dados de Materiais com Propriedades

5.9. BANCO DE DADOS DE PARÂMETROS INTERMEDIÁRIOS DE USINAGEM

Este banco de dados tem a função de armazenar informações intermediárias de todas as etapas do processo de seleção dos parâmetros de usinagem. Como o programa é iterativo, os resultados intermediários relevantes são aqui armazenados temporariamente. Após a solução do problema, eles poderão ser guardados para futuras análises ou apagados. Sua estrutura está apresentada na figura 13.

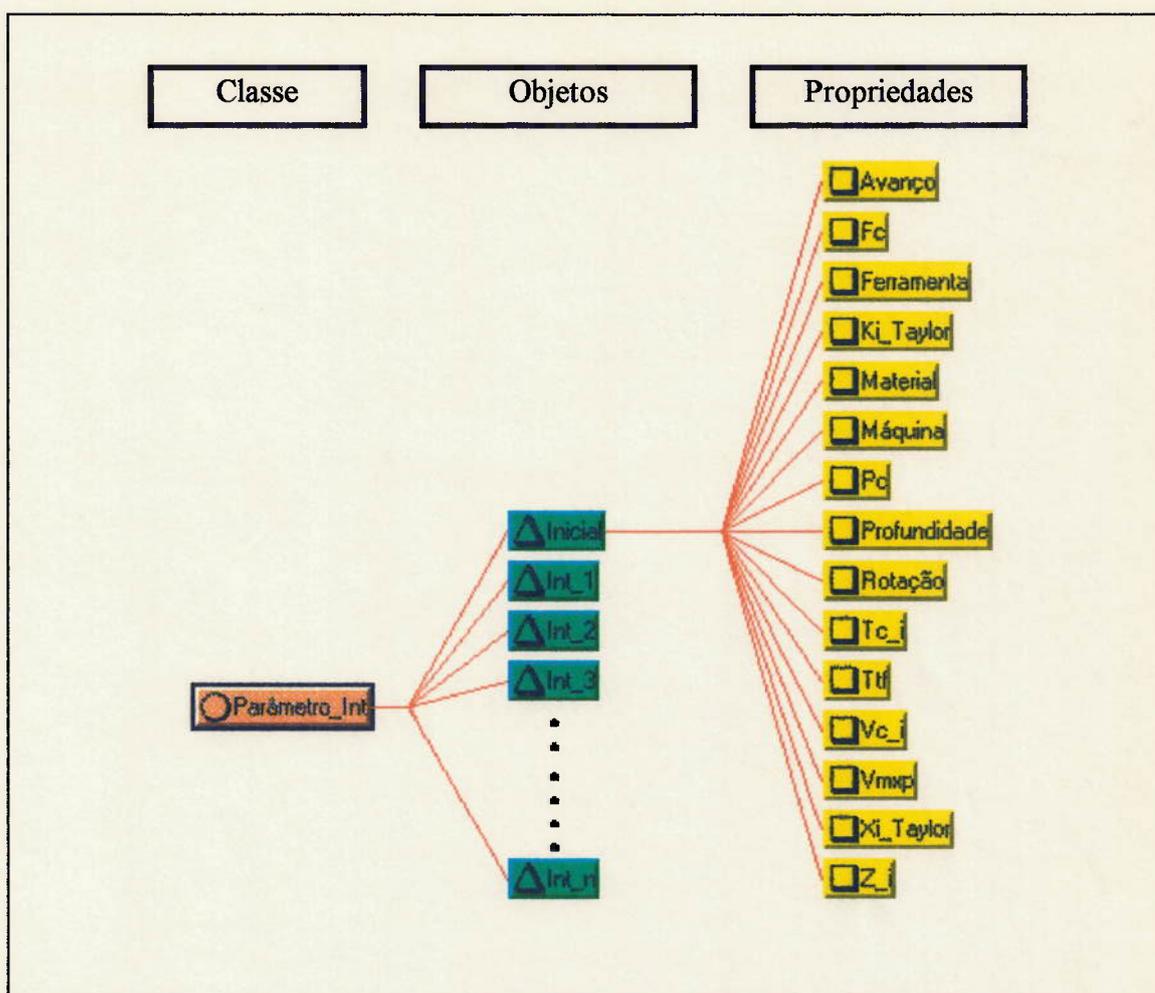


Figura 13 - Banco de Dados de Parâmetros Intermediários

5.10. BASE DE CONHECIMENTO

A Base de Conhecimento foi construída a partir de informações fornecidas pelo especialista e transformadas em fatos e regras. O conhecimento foi representado (codificado) através de regras de produção do tipo: se..., então..., senão..., (*if..., them..., else...,*) um sistema que é baseado em tais regras é chamado de sistema de produção. A figura 14 mostra a forma de como estas regras são implementadas no *Smart Elements*, através do editor de regras.

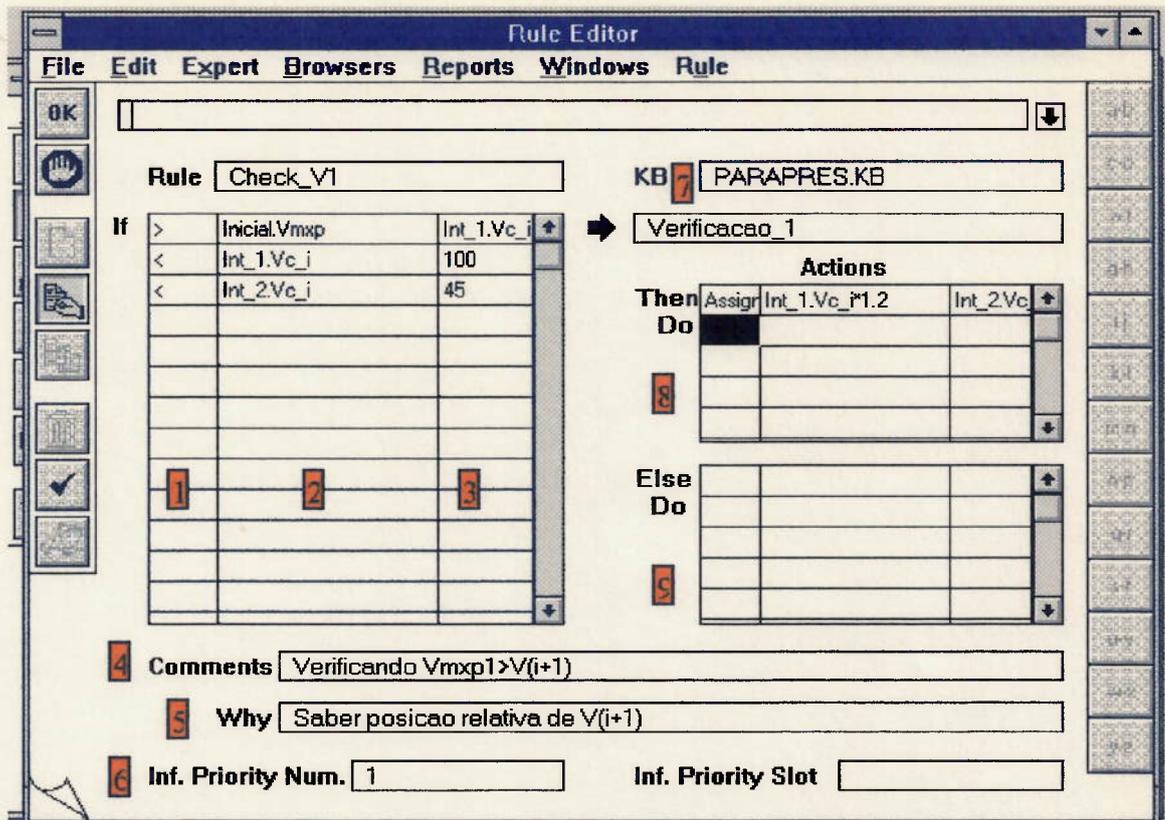


Figura 14 - Montagem de Regras

Na Base de Conhecimento está contido o conhecimento do especialista através de descrições (regras e fatos), relacionamentos (dependências e associações) e procedimentos (raciocínio das operações que devem ser executadas).

Para a implementação desta etapa o *Smart Element* possui os seguintes conceitos e funções disponíveis em sua estrutura:

- Na posição [1] da figura 14, um elemento de relação deve ser atribuído entre os argumentos das posições [2] e [3]. Exemplo : **If** $a_1 > a_2$.

Tantas relações poderão ser montadas quantas forem necessárias em cada regra. A verificação de cada relação obedece ao critério lógico “ E “. Assim sendo, uma regra só será satisfeita se todas as suas relações forem satisfeitas. O estado de cada relação pode assumir três valores : **satisfeito** , e neste caso o *Smart Elements* continua verificando as relações até acabarem e dar por satisfeita a regra; ou **não satisfeito** , e neste caso o *Smart Elements* interrompe a verificação de relações e já dá a regra por não satisfeita. Porém ainda possui a opção de **desconhecida (NOTKNOWN)**, aí o *Smart Elements* continua verificando as relações e se nenhuma relação for dada por não satisfeita ele finalizará a regra com “ estado desconhecido “.

- A relação entre regras de mesmo nível hierárquico obedece ao critério lógico “ OU “. Assim sendo, qualquer regra de mesmo nível que for validada, tornará válido o argumento para o nível seguinte de regras. Uma regra que seja aceita é o suficiente para satisfazer o argumento e as regras seguintes não necessitam ser apreciadas.
- Todas as regras estão associadas a um banco de dados (fatos), posição [7], para a sua execução, mesmo que seja um banco de dados temporário formado por elementos de vários outros bancos de dados, o que no *Smart Elements* é conhecido como banco de dados dinâmico.
- Como as regras são observadas pelo argumento lógico “ OU “, pode-se estabelecer uma ordem para serem examinadas através do campo de prioridade

das regras, posição [6], além de comentários e explicações nos campos [4] e [5], que servirão para explicar o caminho seguido para a decisão tomada.

- Se a regra for satisfeita, as ações contidas na posição [8] (*Then do...*) serão acionadas, senão as ações contidas na posição [9] (*Else do ...*) é que serão acionadas.

Estas são as principais regras lógicas aplicadas na elaboração da base de conhecimento. Diversos outros recursos estão disponíveis o que poderia tornar esta base mais complexa e completa. No presente trabalho, nem todos foram usados.

5.11. MÁQUINA DE INFERÊNCIA

A Máquina de Inferência é a principal componente do SEDCU e ela é o tipo “encaminhamento para frente” (*forward chaining*), isto é, parte de um conjunto de dados iniciais de usinagem, os quais descrevem o estado inicial do problema e estão armazenados em bancos de dados, como foi visto acima. Se as condições de uma determinada regra forem totalmente satisfeitas para esse conjunto inicial de dados, as ações pendentes serão executadas. A execução das ações tem como consequência acrescentar fatos (dados) ao Banco de Dados, ampliando-o. A figura 15 mostra a representação do *Smart Elements* para esta abordagem. A relação cinza é uma relação analisada com solução **desconhecida**; já a relação verde é uma relação analisada como **satisfeita**; a relação amarela é a que está sendo analisada. Caso esta regra seja satisfeita, então o processo continuará progredindo até chegar a um resultado desejado.

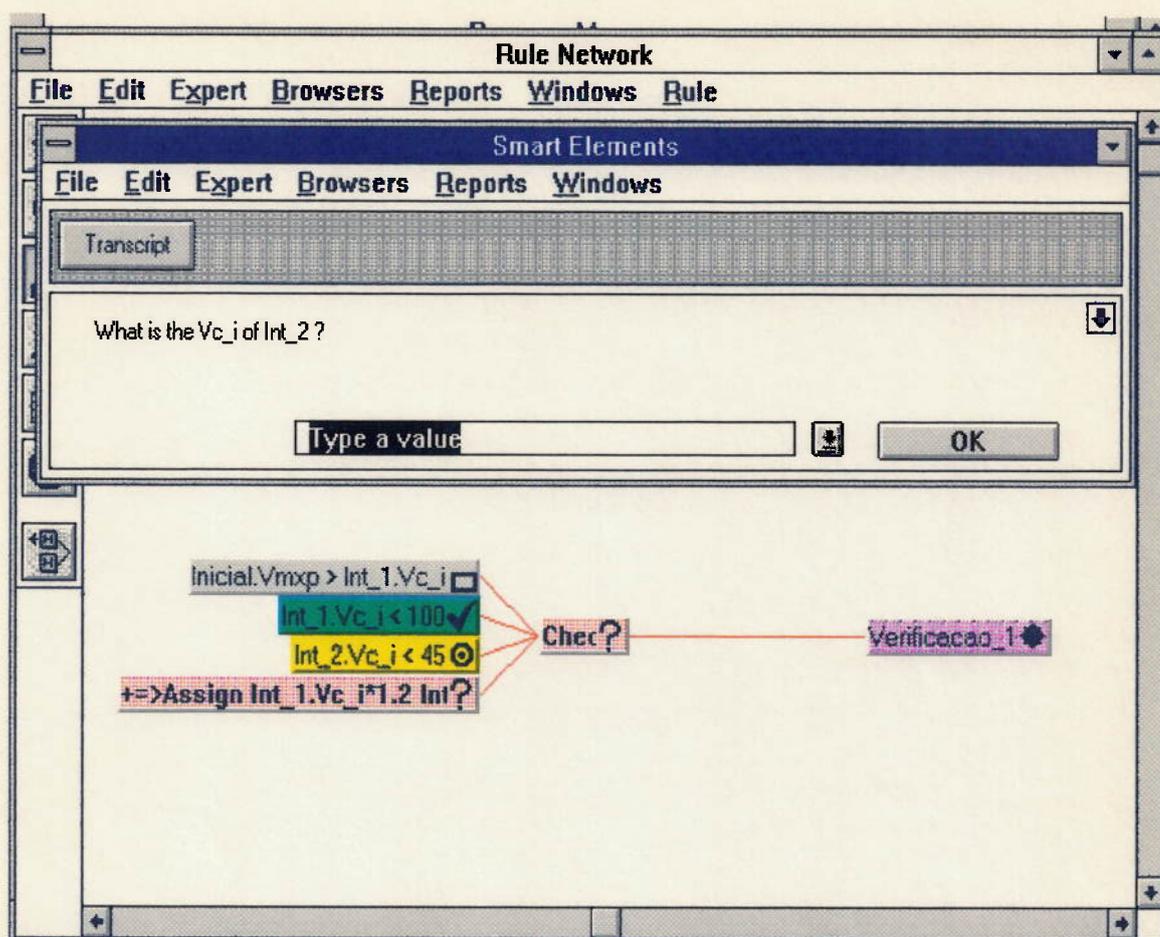


Figura 15 - Verificação de Regras

A Base de Dados modificada levará outras regras ao sucesso, e conseqüentemente provocará a execução das ações correspondentes. O controle operou em ciclos, sendo que, em cada ciclo as regras são examinadas pela máquina de inferência, e é ela quem determina quais são as regras aplicáveis e quais ações devem ser disparadas. Se várias regras são aplicáveis a um certo ciclo, somente uma delas será escolhida para ser executada. A esta escolha dá-se o nome de resolução de conflitos, o que normalmente é implementado através de prioridades diferentes dentro do mesmo nível das regras.

5.12 METODOLOGIA APLICADA NA SOLUÇÃO DO PROBLEMA

A aplicação da metodologia desenvolvida por Vilella (Vilella,1988) para otimização da produção com base na velocidade de corte de máxima produção foi feita em fabricação por lotes, onde estava sendo utilizado o princípio da tecnologia de grupo, sendo a sua aplicabilidade avaliada em condições de produção.

Essa metodologia tem por base:

- a- adoção de uma velocidade de corte inicial;
- b- adoção de um critério de vida;
- c- computação estatística do número de peças usinadas por vida da ferramenta para a velocidade de corte adotada;
- d- cálculo ou medição do tempo de corte;
- e- adoção de nova velocidade de corte e computação estatística do número de peças correspondentes;
- f- caracterizando-se as situações acima como (i) e (i +1), pode-se associar às mesmas, as velocidades Vc_i e Vc_{i+1} ; o número médio de peças por vida correspondente Z_i e Z_{i+1} e os tempos de corte tc_i e tc_{i+1} ;
- g- cálculo das constantes de Taylor;

$$x = \frac{\log(Z_i / Z_{i+1})}{\log(Vc_i / Vc_{i+1})} + 1 \quad \text{Equação 19}$$

$$k = Z_i * tc_i * Vc_i^x \quad \text{Equação 20}$$

h- paralelamente a este processo, medir com confiança estatística o tempo de troca t_n , obtendo-se um tempo médio de troca.

i- calcular a velocidade de máxima produção:

$$V_{mxp} = \sqrt{\frac{k}{(x-1) * (t_{jt})}} \quad \text{Equação 21}$$

j- comparar V_{mxp} com V_{c_i} e $V_{c_{i+1}}$

- se $V_{mxp} > V_{c_{i+1}}$, repita a operação acrescentando V_{c_i} de 20%
- se $V_{c_i} < V_{mxp} < V_{c_{i+1}}$, assuma V_{mxp} como velocidade de referência
- se $V_{mxp} < V_{c_i}$, repita a operação reduzindo-se V_{c_i} de 20%

k- determinação da “velocidade ótima” como um percentual da V_{mxp} definida com referência à dados sobre custos do SMFD (Sistema Máquina Ferramenta e Dispositivos) existentes na Base de Dados e Base de Conhecimento.

5.13 INTERFACE COM O USUÁRIO

Foi implementada através do *Open Interface do Smart Element*, que nada mais é do que um ambiente de programação *Windows*. Todos os recursos normalmente disponíveis em programas neste ambiente podem ser usados com facilidade. Figuras das janelas de diálogo entre o usuário e o sistema serão abaixo exibidas e comentadas.

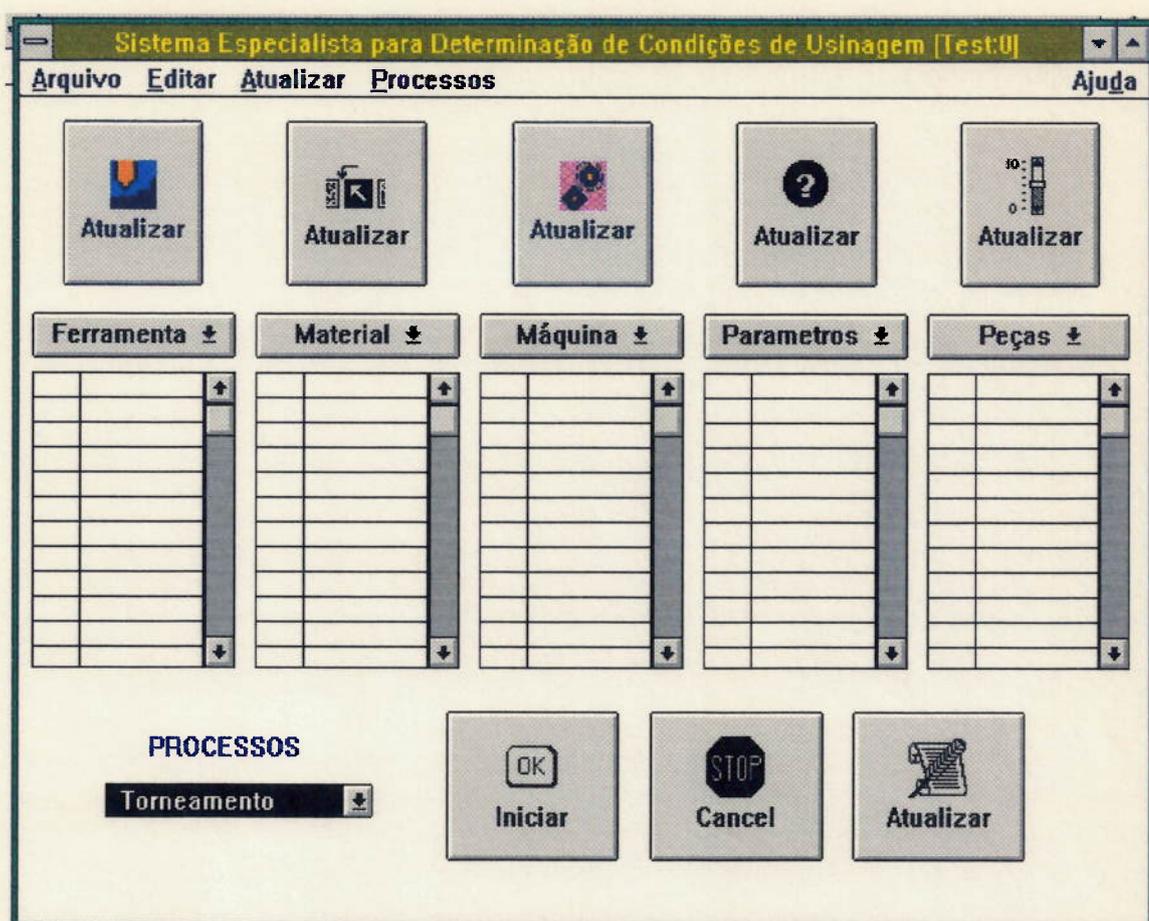


Figura 16 - Tela Inicial do Sistema

Nesta tela, figura 16, podemos introduzir os valores de entrada do sistema através dos bancos de dados ou diretamente pelas janelas de apresentação de dados. Para auxiliar a pesquisa aos bancos de dados, o botão com o nome escrito sobre ele, quando acionado navega sobre classes e objetos na busca da informação desejada. O botão identificado por “atualizar” acima do nome do banco de dados, serve para introduzir novos elementos ou modificar o seu conteúdo. Esta modificação, também pode ser feita através do botão “atualizar” na parte inferior da tela, somente que de forma coletiva para todas as bases de dados.

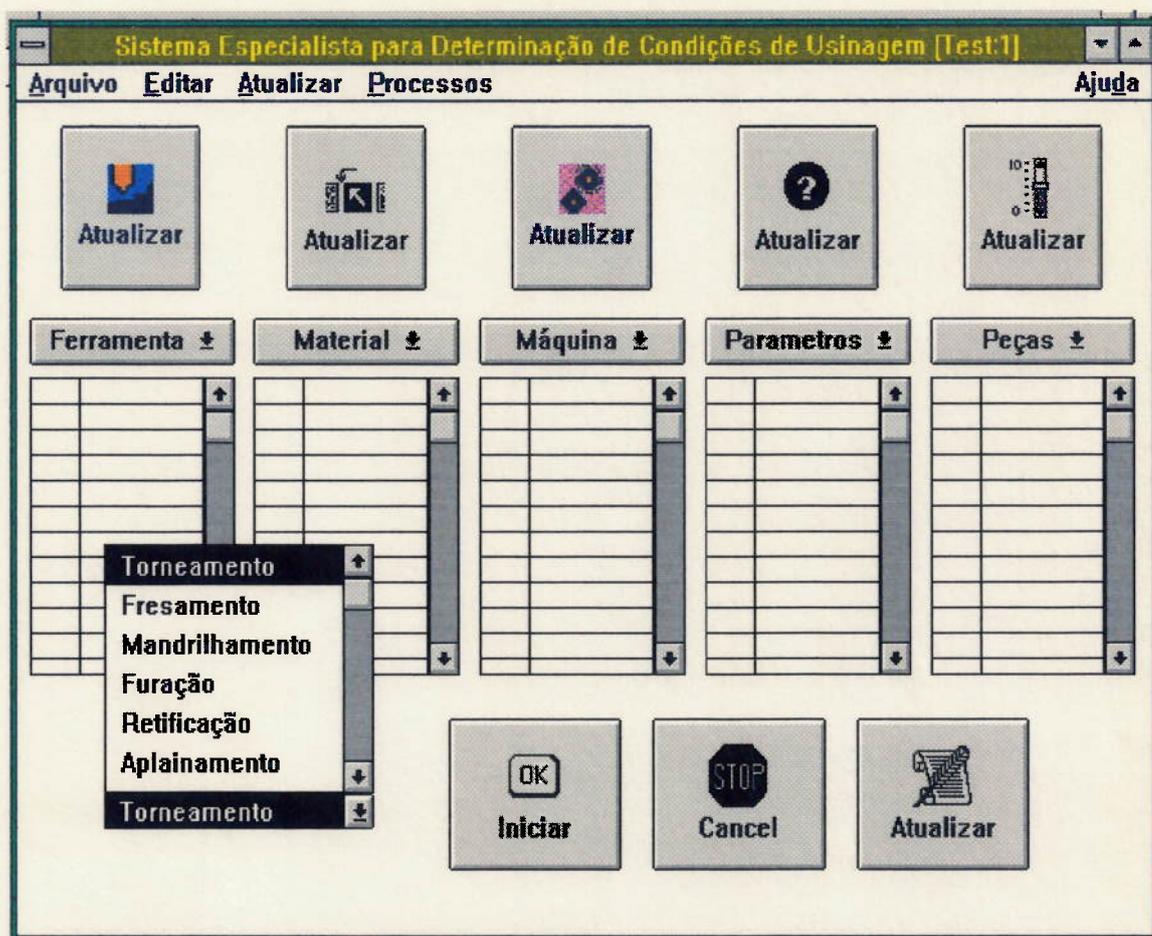


Figura 17 - Tela Inicial do Sistema Especialista

Nesta tela, figura 17, apresentamos em destaque a opção da janela de processos aberta para seleção. É a primeira janela que deverá ser usada e a opção de processo escolhida, pois a ela se associará a parte do banco de dados de ferramentas e máquinas adequadas, facilitando assim a busca dos elementos desejados.

Cabe notar que as mesmas opções de escolha estão disponíveis através dos menus do tipo “pull-down”, como podem ser observados nas figuras 18 e 19 .

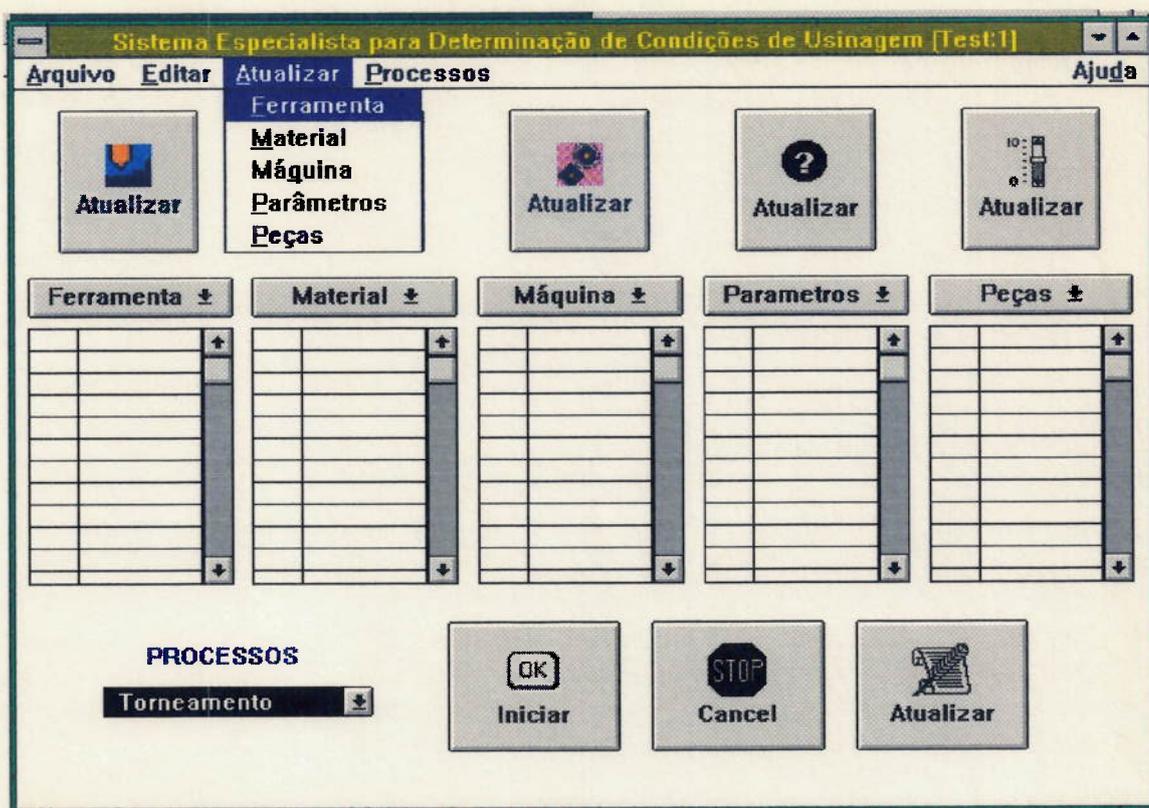


Figura 18 - Tela Inicial do Sistema - Atualizar

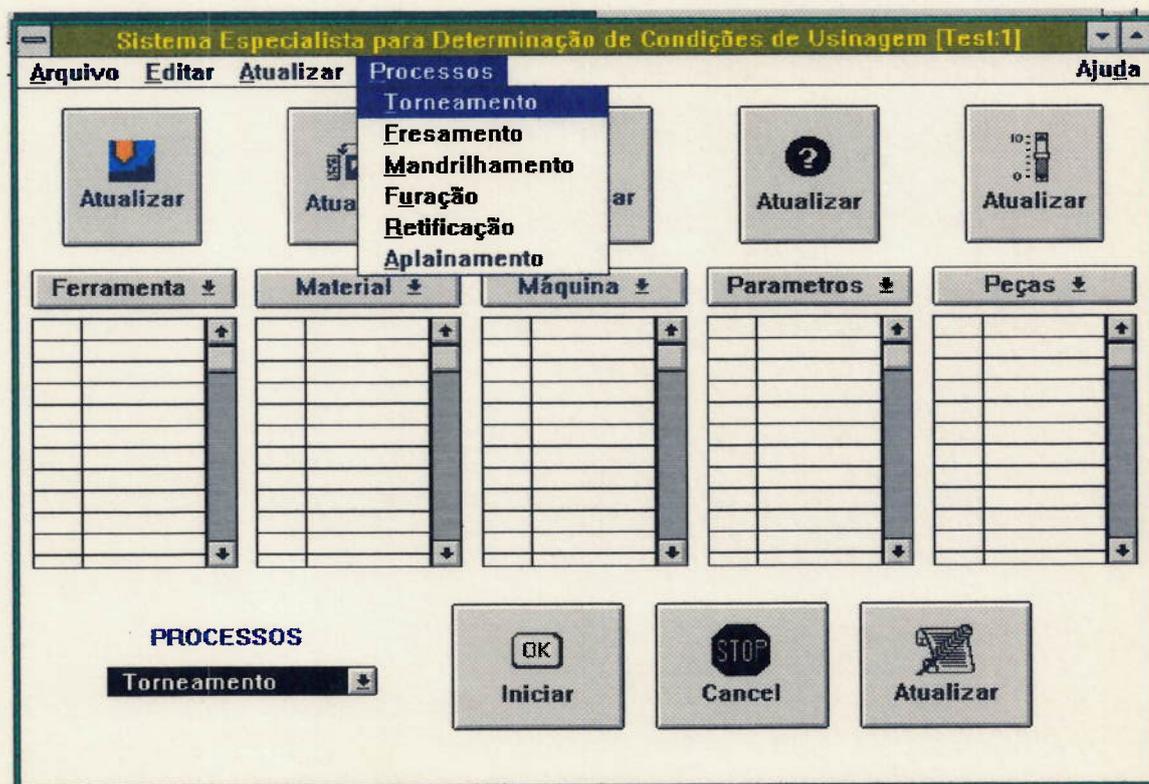


Figura 19 - Tela Inicial do Sistema - Processo

CAPÍTULO 6

RESULTADOS, DISCUSSÃO, CONCLUSÕES

6.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a validação da máquina de inferência em relação à otimização da velocidade de corte, as condições iniciais de uma determinada operação foi usada como ponto de partida e sete iterações observadas, conforme podemos observar pela tabela 6.1 abaixo, que é um resumo dos resultados obtidos.

Vc	Vm _{xp}	x	k	t _c	t _{ft}	i
180				1,50	1,7	1
216	1191	1,8724	8,52E+06	1,13	1,7	2
259	714	2,2713	6,55E+07	0,84	1,7	3
311	465	2,9904	3,21E+09	0,63	1,7	4
373	342	4,8017	9,45E+13	0,47	1,7	5
447	359	3,5778	6,05E+10	0,36	1,7	6
537	346	3,8017	2,14E+11	0,27	1,7	7

Tabela 4 - Resultado Obtidos pela Aplicação do SEDCU

Analisando-se os resultados obtidos com a aplicação do SEDCU, podemos fazer as seguintes considerações :

- a) Os resultados mostraram uma relação adequada entre os dados obtidos e o que se esperava obter da relação vida-ferramenta de, para o sistema analisado.

- b) Os resultados obtidos para a $V_{m_{xp}}$ mostram-se razoáveis, especialmente nas operações de acabamento
- c) Podemos observar que na linha onde $i=4$, temos: $V_{m_{xp}} > V_c$. Assim, repetindo a operação acrescentando V_c de 20%, chegamos ao resultado da linha $i=5$ onde $V_{c_4} < V_{m_{xp}} < V_{c_5}$. O valor da $V_{m_{xp}}$ deve aqui ser assumido, como definido pela metodologia.
- d) O operador do SEDCU não precisa saber conceitos de usinagem, pois o próprio sistema dirá a ele o que fazer, quando parar, e quais resultados aplicar. Assim fica dispensada a presença de qualquer especialista da área.
- e) É importante observar o **cenário de aplicação do SEDCU**; a não observação deste aspecto pode tornar o resultado inadequado para aplicação prática.
- f) O tempo de troca de ferramenta tem influência importante no resultado final do problema. Sistemas onde o tempo de troca tende a zero ou é inexistente não devem usar esta metodologia.
- g) O *Smart Elements* é uma ferramenta apropriada na implantação de sistemas deste tamanho, porém com o aumento do tamanho do sistema, os equipamentos com processadores 486 ou pentium (linha IBM-PC), começam a ficar lentos na execução das soluções.

6.2 CONCLUSÕES

O desenvolvimento deste trabalho foi direcionado na intenção de cumprir-se os objetivos propostos. Assim, definida a metodologia e o cenário de aplicação do mesmo, buscou-se as ferramentas mais adequadas, que estivessem disponíveis, para a sua implantação. Durante os estudos e desenvolvimento do mesmo, verificou-se que:

- a) A aplicação de princípios de Inteligência Artificial na construção do SEDCU, reduziu significativamente o tempo requerido para se obter os resultados desejados, dentro de um mesmo nível de confiabilidade.
- b) O sistema pode ser ampliado e melhorado em diversos aspectos com relativa simplicidade, já que o sistema de programação usado pelo *Smart Elements* é bastante flexível para isso. Uma das aplicações mais interessantes que podem ser implementadas com facilidade é o dispositivo de encadeamento para trás, onde dado uma determinada condição final, pode-se determinar quais foram as condições iniciais para o problema.
- c) O sistema implementado dispensa qualquer conhecimento em usinagem, por parte do operador, para a sua aplicabilidade. Além disso, como as bases de dados vão sendo alimentadas de novos conhecimentos à medida que utilizamos o sistema, o mesmo vai ficando mais preciso e rápido. Todo esse conhecimento adquirido poderá ser usado por qualquer um e nunca será perdido, como no caso de especialistas humanos.

- d) Este sistema foi implementado para fábricas semi-automatizadas, porém nada impede de ser aplicada em fabricas mais automatizadas, onde as funções de obtenção dos dados ficariam a cargo de sensores instalados em máquinas ferramentas.

6.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- a) Implementação de mecanismos para a seleção automática de ferramentas.
- b) Implementação de algoritmos para a solução de casos quando o número de peças não é suficiente para consumir uma aresta da ferramenta.
- c) Implementação do mecanismo de encadeamento para trás, com o objetivo de análise.
- d) Inclusão de sistemas de cálculos de custo.
- e) Implementação de algoritmos para a solução de casos onde não exista o tempo de troca de ferramentas.
- f) Inclusão no sistema de outros tipos de operações

RELAÇÃO DE FIGURAS

<i>Figura 1 - Principais Aplicações de IA</i>	46
<i>Figura 2 Arquitetura de um SE (Schaffer, 1986)</i>	74
<i>Figura 3. Etapas de Desenvolvimento do SEDCU</i>	78
<i>Figura 4 Arquitetura do SEDCU para Sistemas Automáticos</i>	80
<i>Figura 5 Arquitetura do SEDCU para Sistemas Semi-Automáticos</i>	80
<i>Figura 6 - Estrutura baseada em Classes & Objetos - Smart Elements</i>	83
<i>Figura 7 - Banco de Dados de Peça</i>	84
<i>Figura 8 - Banco de Dados de Ferramenta - Classe e Subclasses</i>	85
<i>Figura 9 - Banco de Dados de Ferramenta - Classe & Objetos</i>	86
<i>Figura 10 - Banco de Dados de Máquina</i>	87
<i>Figura 11 - Banco de Dados de Materiais</i>	88
<i>Figura 12 Banco de Dados de Materiais com Propriedades</i>	89
<i>Figura 13 - Banco de Dados de Parâmetros Intermediários</i>	90
<i>Figura 14 - Montagem de Regras</i>	91
<i>Figura 15 - Verificação de Regras</i>	94
<i>Figura 16 - Tela Inicial do Sistema</i>	97
<i>Figura 17 - Tela Inicial do Sistema Especialista</i>	98
<i>Figura 18 - Tela Inicial do Sistema - Atualizar</i>	99
<i>Figura 19 - Tela Inicial do Sistema - Processo</i>	99

RELAÇÃO DE TABELAS

<i>Tabela 1 - Comparação entre IA e Computação Convencional.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabela 2 _Comparação entre Conhecimento Humano e Artificial.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabela 3 Definição do Tamanho de um SE.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabela 4 - Resultado Obtidos pela Aplicação do SEDCU.....</i>	<i>100</i>

BIBLIOGRAFIA

- ANTUNES, A. **Inteligência Artificial: Sistemas Especialistas, Conhecimento, e mais...** .
Makron Books Informa: Makron Books - n.56, p. 3, fev. 1993.
- ARARIBOIA, G. **Inteligência Artificial: Um Curso Prático.** s.l., LTC, 1988.
- BARBORAK, D.M. **PC-Based Expert Systems and their Application to Welding.**
s.l., Welding, jan. 1991, p.29 -38.
- BATOCCHIO, A. **Um Modelo de Índice de Automação Relacionado à Flexibilidade e à Produtividade dos Sistemas de Manufatura.** Campinas, 1991. n.p. Tese (Doutorado)-UNICAMP.
- BATOCCHIO, M.C.; CUPINI, N. **Desenvolvimento de um Sistema Especialista de Usinagem.** Campinas, 1993. n.p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, UNICAMP.
- BELLINGER, J.G. **The Factory of the Future: Technological Aspects.** s.l., Annals of CIRP, v.37, p. 551-552 , fev. 1988.
- BRASIL, Ministério da Indústria e Comércio, Secretaria da Tecnologia Industrial, **Determinação das Características de Usinagem dos Materiais e Ferramentas de Procedência Nacional na Operação de Torneamento,** s.l., s.ed., 1976.
- CAD/CAM industry report 1992. **Machine Design,** mai. 1992, p.88-93 (Apostila do curso de Automação Industrial/ CAD-CAM -Sindimaq/Abimaq-IPT).

- CAMPOS, M.B. Um molde para Sistemas Especialistas, **PC-Mundo**, p. 40-42, dez. 1988.
- CAULLIRAUX, H.B.; ALVARENGA, M.A.B. Robótica: Opção Nacional. **Boletim Sobracon**, n.45, p.41-58, 1989
- CHANG, T.C. **Expert Process Planning for Manufacturing**. s.l., Addison-Wesley Publishing Company, 1990.
- CHORAFAS, D.N. **Sistemas Especialistas: Aplicações Comerciais**. s.l., McGraw Hill, 1988
- CHUA, H.; LOH, Y.; WONG, M. Optimization of Cutting Conditions for Multipass Turning Operations Using Sequential Quadratic Programming. **Journal of Materials Processing Technology**, Singapore University, n.28, p.253-262, 1991.
- COAD, P., YOURDON, E. **Projeto Baseado em Objetos**, Editora Campus, 1993.
- COLDING, B. A Boa Escolha de Parâmetros de Usinagem Leva a Muitos Ganhos. **Máquinas e Metais**, p. 86-94, fev., 1992.
- COSTA, A.; GURGEL, C. Inteligência Artificial, quinta geração a caminho. **Micro Sistemas**, p.8-10, mai. 1985,.
- CUNHA, H.; RIBEIRO, S. **Introdução aos Sistemas Especialistas**. s.l., Livros Técnicos e Científicos Editora S/A, 1987.
- DEGARMO, E.P.; BLACK, J.T.; KOHSER, R.A. **Materials and Processing in Manufacturing**. 6. ed. s.l., Macmillan Publishing Company, 1984.
- DINIZ, A.E. et al. Otimização das condições de usinagem em células. **Máquinas e Metais**, p. 48-54, jun. 1989.

- DINIZ, E.; CUPINI, N.; VILELA, R.. Otimização de Condições de Usinagem em Células de Fabricação. In: 1o. SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE TECNOLOGIA DE USINAGEM, 1989. **Anais. s.n.t.**
- DOYLE, E.L.; KEYSER, C.A.; LEACH, J.L. **Manufacturing Processes and Materials for Engineers**, s.l., Prentice Hall, 1985.
- DUQUE SANTA, W. **Estudo da Modelagem Matemática para Otimização das Condições de Usinagem**. Campinas, 1989. n.p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP.
- DVORAK, P. Designers get smart about manufacturing. **Machine Design**, p.101-106, ago.1992.
- ELORANTA, E. et al. Knowledge-based tool for manufacturing system design. **Computer-Integrated Manufacturing Systems**, v.3, n.3, p.163-170, 1990.
- FERRARESI, D. **Características de Usinagem de Metais para Operação de Torneamento - Força e Velocidade de Corte para Diferentes Metais**. s.l., ABNT-P1, nov. 1986.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo, Edgar Blücher, 1970.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo, Edgar Blücher, 1977.
- FERRARESI, D. Otimização das Condições de Usinagem em uma Empresa de Produção Seriada. 1o SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE TECNOLOGIA DE USINAGEM, 1989. **Anais. s.n.t.**
- FRIEDMAN, M. Y., FIELD, N., KALLAS, J. F. **Machinability Data Bank Design**. **Anais do C.I.R.P. Vol 23**, 1974, pág 171-172.

- GROOVER, M.P. **CAD/CAM - Computer Aided Design and Manufacturing**. New Jersey, Prentice Hall, 1984.
- GROOVER, P. M. **Automation, Production Systems and Computer Aided Manufacturing**. Prentice Hall, New Jersey, 1980.
- KOULAMAS, C. Simultaneous Determination of Optimal Machining Conditions and Tool Replacement Policies in Constrained Machining Economic Problems by Geometric Programming. **International Journal of Production Research**, Florida International University, n.29, pág 2407-2421, s.d.
- KRAUSE, F.L. Configuração de Produtos com SE. **Máquinas e Metais**, n.307, p. 50-65, ago. 1991.
- KUSIAK, A. **Intelligent Manufacturing Systems**, s.l., Prentice Hall, 1990.
- LEVINE, C. et al. **Inteligência Artificial e Sistemas Especialistas**. s.l., McGraw Hill, 1988.
- LIU, D. **Utilization of Artificial Intelligence in Manufacturing**. CAPP: From Design to Production. 1. ed. s.l., Society of Manufacturing Engineers, 1988, p.184-200.
- LUCENA, C. **Inteligência Artificial e Engenharia de Software**. **Publicações Acadêmicas Científicas**, Rio de Janeiro, PUC-RJ / IBM Brasil, 1987.
- LYE, S.W.; YEO, S.H. Development of an Integrated CAD/CAPP/CAM System for Turning Operations. **Journal of Materials Processing Technology**, n.29, p.103-117, 1992.
- MARI, D.; GONSETH, D.R. A New Look at Carbide Tool Life. **Wear**, Lousanne, n.165, p.9-17, 1993.

- METCUT RESEARCH ASSOCIATION. **Machining Data Handbook**. Machinability Data Center, 3rd Edition, Cincinnati, Ohio, 1980.
- NISHIZAWA, H.; SAKAKIBARA, J. Parâmetros para Selecionar Diâmetros de Corte. 1o SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE TECNOLOGIA DE USINAGEM, 1989. **Anais. s.n.t.**
- NOVASKI, O. **Custos de Usinagem**. Campinas, Centro de Tecnologia de Campinas, 1990.
- OLIVEIRA, C.M. **Informática e Automação: instrumentos de competitividade**. **Datanews**, nov. 1990.
- OLIVEIRA, J.L. Mercado Mundial de IA cresce 50% em 10 anos. **Datanews**, abr. 1991.
- PALLEROSI, C.A.; CUPINI, N.L. Durabilidade de Ferramentas de Corte na Usinagem dos Metais. **Metalurgia**, v.31, n.215, out. 1975.
- PASSOS, E.L. **Inteligência Artificial e Sistemas Especialistas**. s.l., LTC Editora Ltda, 1987.
- PASSOS, E.L. **Sistemas Especialistas**. **Micro Sistemas**, p.58-61, dez. 1985.
- PEREZ, C. **Microeletrônica, Ondas largas y Cambio estructural Mundial**. Science Policy Research Unit (SPRU), Universidade de Sussex, julho 1984.
- PHAM, D.T.; OZTEMEL, E. XPC: an on-line expert system for statistical process control. **Int. J. Prod. Res.**, v.30, n.12, p.2857-2872, 1992.
- PRESSMAN, R.S., WILLIAMS, J. **Numerical Control and Computer Aided Manufacturing**. John Wiley, New York, 1977.

RICH, E. Inteligência Artificial. s.l., McGraw Hill, 1988.

ROSHAM, H. Md.; SUDESH, H. Sistemas Especialistas para Análise de Defeitos de Fundição. Máquinas e Metais, n.295, p.56-59, ago. 1990.

ROZENFELD, H. Planejamento de Processo por Computador - Uma Tecnologia Acessível a Indústria Brasileira. SEMINÁRIO USINAGEM E AUTOMAÇÃO PARA A COMPETITIVIDADE E QUALIDADE, Agosto, 1993, **Notas.** s.n.t.

RYMER DA SILVA CARVALHO, R. Características de Usinagem sob o Ponto de Vista Econômico. Campinas, 1991. n.p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, UNICAMP.

SALIBA, W.L.C. Técnicas de Programação. s.l., McGraw Hill, 1992.

SANDVIK Coromant. Catálogo de Ferramentas e Insertos para torneamento. (produtos para trabalho com metais). s.n.t.

SCHORR, H. CONFERENCE ON INNOVATION APPLICATION ON ARTIFICIAL. California, Stanford University, Mar. 1989. **Proceedings.**

SCHWABE, D.; CARVALHO, R.L. Engenharia de Conhecimento e Sistemas Especialistas. s.l., Editorial Kapelusz S.A., fev. 1987.

SOTIROV, G.; VITANOV, V. Multi-criteria Optimization of Cutting Processes. Journal of Materials Processing Technology, Sofia Technical University, n.31, p.307-313, 1992.

STIPKOVIC, M., Usinagem, s.l., MAUÁ/EPUSP/FEFAAP, s.d.

VALLIERE, D. Expert Systems that really work. CIME, ago. 1988, pág 14-16.

VILELLA, R.C. **Metodologia prática visando a otimização das condições de usinagem em células de fabricação.** Campinas, 1988. n.p. Dissertação (Mestrado)-UNICAMP.

WEIL, R., SPUR, G., EVERSHEIM, M. **Survey of Computer Aided Processing Planning Systems.** Anais do C.I.R.P. Vol 32, 1982, pág 539-548.

WHITE, B.; HOUSHYAR, A. **Quality and Optimum Parameter Selection in Metal Cutting.** *Computers in Industry*, n.20, p.87-98, 1992.

YOUNG, J.F.; SHANE, R. **Material and Processes.** 3. ed., part B, s.l., Marcel Dekker, INC, 1985.
