

JOSÉ CARLOS DA SILVA

SISTEMA ESPECIALISTA APLICADO À TÉCNICA DE  
USINAGEM POR ELETROEROSÃO

Dissertação apresentada para obtenção do  
Título de Mestre em Engenharia Mecânica  
pela Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Automação  
Industrial e Robótica.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Octávio M. Reis.

Taubaté – SP

2004

JOSÉ CARLOS DA SILVA

SISTEMA ESPECIALISTA APLICADO À TÉCNICA DE  
USINAGEM POR ELETROEROSÃO.

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ, TAUBATÉ, SP

Data: 04/12/2004

Resultado:..Aprovado

Comissão Julgadora

Prof. Dr. Luiz Octávio Mattos Reis

Instituição: Universidade de Taubaté - UNITAU

Assinatura:.....

Prof. Dr. Samuel Euzédice de Lucena

Instituição: Universidade de Taubaté - UNITAU

Assinatura:.....

Prof. Dr. Leonardo Mesquita

Instituição: Universidade Estadual de São Paulo - UNESP

Assinatura:.....

À minha esposa, Silvia, pelo apoio e incentivo  
durante a conclusão deste trabalho.

## Agradecimentos

Ao nosso **DEUS**, por conceder-me saúde, inteligência e por ter amparado-me nos momentos em que pensei em desistir.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luiz Octávio, pela paciência, boa vontade e ajuda na conclusão deste trabalho.

Às bibliotecas da Universidade Mackenzie, FATEC – SP e Senai “Roberto Simonsen”, pelos livros cedidos.

Aos amigos Eduardo Pinto e José Simplício Neto, pela colaboração e companheirismo.

Silva, J.C. **Sistema Especialista Aplicado à Técnica de Usinagem por Eletroerosão**. 2004 . 76p. Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade de Taubaté, Taubaté.

## Resumo

O presente trabalho de dissertação relata o desenvolvimento de um sistema especialista aplicado à técnica de usinagem por eletroerosão. O sistema foi desenvolvido utilizando-se uma *SHELL* de domínio público e implementado a partir de regras de produção, tendo como objetivo armazenar, recuperar e modificar de maneira satisfatória todo conhecimento teórico e heurístico adquirido pelo especialista no processo.

Palavras-chaves: Sistemas Especialistas; Aquisição de Conhecimento; Eletroerosão.

Silva, J.C. **Specialist System Applied to the Technique of Electrical Discharge Machining**. 2004. 76 levas. Paper for attainment of the Heading of Master in Engineering Mechanics of the University of Taubaté, Taubaté, São Paulo.

## Abstract

This paper presents an approach to the expert system development applied to machining technique by electroerosion. The system was developed using the *SHELL* of public domain and implemented from rules production, the objective is to store, to recover and modify of satisfactory way all heuristic and theoretical knowledge obtained by process specialist.

Words-keys: Specialist System; Knowledge Acquisition; Electroerosion.

Sumário

Resumo	5
Abstract	6
Lista de Figuras	10
Lista de Tabelas	11
Capítulo 1 – Introdução	12
1.1 - Organização do Trabalho	13
Capítulo 2 – Revisão da Literatura	
2.1 – Conceito de Usinagem	14
2.2 – Métodos não Tradicionais de Usinagem	14
2.3 – Usinagem por Descargas Elétricas	15
2.4 – Princípios Físicos do Processo	17
2.5 – Sistema de Limpeza	21
2.6 – Fluídos Dielétricos	22
2.7 – Considerações Finais e Aplicações do Processo	22
2.8 - Sistemas Inteligentes	24
2.9 – Diferenças entre Sistemas Convencionais e Sistemas Baseados em Conhecimento	25
2.10 – Diferenças entre Sistemas Especialistas e Sistemas Baseados em Conhecimento	26
2.11 – Estrutura Geral de um Sistema Baseado em Conhecimento	28
2.12 – Representação do Conhecimento	29
2.13 – Metodologia e Técnicas Aplicadas em Regras de Produção	29
2.14 – Desenvolvimento de um Sistema Baseado em Conhecimento	30
2.14.1– Planejamento de um Sistema Baseado em Conhecimento	31
2.14.2 – Aquisição de Conhecimento	31
2.15 – Ferramentas de Suporte na Construção de Sistemas Baseados em Conhecimentos	32
2.16 – Técnicas de Aquisição de Conhecimento	33
2.16.1 – Aquisição de Conhecimento Baseado em Descrições	33
2.16.2 – Aquisição de Conhecimento Baseado em Entrevistas Estruturadas	34

2.16.3 – Aquisição de Conhecimento Baseada no Reuso da Representação e dos Mecanismos de Inferência	35
2.17 – Considerações e Aplicações de Sistemas Inteligentes	35

### Capítulo 3 - Proposição

3.1 – O Problema da Escolha dos Parâmetros de Rugosidade	37
3.1.1 – Material a ser Usinado	38
3.1.2 – Material do Eletrodo	38
3.1.3 - Rugosidade	39
3.1.4 – Intensidade da Corrente	39
3.1.5 – Tempo de Impulso e Pausa	40
3.1.6 – GAP	41
3.1.7 – Remoção de Material / Desgaste do Eletrodo	42
3.1.8 – Sistema de Limpeza	43
3.2 – Considerações Finais	46

### Capítulo 4 - Material e Método

4.1 – Materiais	47
4.2 – Método	47
4.2.1 - Sistema Especialista Aplicado á Técnica de Usinagem por de Eletroerosão	47
4.2.2 – Etapas de Desenvolvimento do Sistema	49
4.2.3 – Arquitetura do Sistema Especialista Aplicado á Técnica de Usinagem por Eletroerosão	50
4.2.3.1 – Base de Conhecimento	50
4.2.4 – Desenvolvimento do Ambiente do Sistema Especialista Aplicado à Técnica de Usinagem por Eletroerosão	55
4.2.4.1 – Definição das Variáveis	55
4.2.4.2 – Definindo os Objetivos	56
4.2.4.3 – Edição das Regras de Produção	58
4.2.4.4 – Implementando Informações Adicionais	59
4.2.4.5 – Criação de Senhas	60
4.3 – Considerações Finais	61



Capítulo 5 – Resultados	
5.1 – Inicialização do Sistema	62
5.1.1 – Iniciando uma Consulta	63
5.1.2 – Diálogo entre Usuário e o Sistema Especialista	64
Capítulo 6 – Conclusão	71
Bibliografia	72
Anexos	74

## Lista de Figuras

Figura 2.1 – Processo de Usinagem por Eletroerosão	16
Figura 2.2 – Formação de Crateras	18
Figura 2.3 – Padrão de Rugosidade	19
Figura 2.4 – Diagrama Tensão / Tempo	20

Figura 2.5 – Eletroerosão por Penetração	23
Figura 2.6 – Aquisição e Representação do Conhecimento	34
Figura 3.1 – Elipse	40
Figura 3.2 – GAP	42
Figura 3.3 – Sistema de Limpeza por Pressão	43
Figura 3.4 – Sistema de Limpeza por Sucção	44
Figura 4.1 – Arquitetura do SE Aplicado à Técnica de Usinagem por Eletroerosão	50
Figura 4.2 – Menu para Criação de Variáveis	56
Figura 4.3 – Menu para Definição dos Objetivos	57
Figura 4.4 – Tela para Formulação de Perguntas	58
Figura 4.5 – Edição das Regras de Produção	59
Figura 4.6 – Configuração da Tela de Apresentação	60
Figura 4.7 – Criação de Senhas	61
Figura 5.1 – Sub-Menu das Bases de Conhecimento	62
Figura 5.2 – Tela de Abertura	63
Figura 5.3 – Diálogo entre o Usuário e o Sistema	65
Figura 5.4 – Diálogo entre o Usuário e o Sistema	65
Figura 5.5 – Diálogo entre o Usuário e o Sistema	66
Figura 5.6 – Tela de Resultados	66
Figura 5.7 – Resposta não Encontrada	68
Figura 5.8 – Base de Conhecimento Incompatível	68
Figura 5.9 – Fim de Consulta	68
Figura 5.10 – Busca Manual dos Parâmetros de Rugosidade	69
Figura 5.11 – Busca dos Parâmetros Utilizando o SE	70
Figura 5.12 – Sistema Convencional <i>versus</i> Sistema Especialista	70

## Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Tabela de Valores para o Cálculo de Amperagem	39
Tabela 3.2 – Tabela de Parâmetros de Rugosidade	45

## Capítulo 1 - Introdução

Atualmente torna-se cada vez maior o interesse pelo desenvolvimento de ferramentas computacionais que apoiem as tarefas de manufatura.

Uma das possibilidades encontradas refere-se ao uso de sistemas inteligentes que propiciem a automatização de ações antes feitas exclusivamente pelo homem dentro dos setores produtivos.

Nos dias atuais, em que a globalização requer uma postura mais agressiva das empresas, estes sistemas são de fundamental importância, obrigando-as a explorar todas as possibilidades que possam resultar em aumento de competitividade e produtividade.

Para serem competitivos os produtos precisam apresentar uma boa relação custo / benefício e para que isto se torne realidade o esforço de profissionais da área técnica é de suma importância.

O processo de usinagem por descargas elétricas ou eletroerosão como é mais conhecida, é largamente empregado nos vários processos da indústria metalúrgica nos segmentos: automobilístico, fundição, plástico, aeronáutica e aeroespacial.

Todas essas aplicações são em virtude de sua extrema capacidade de usar metais ou ligas de alto grau de dureza e que apresentam alta resistência aos processos de usinagem convencional.

Este processo é realizado normalmente na etapa final de uma seqüência de operações, quando a peça já tem um alto valor agregado, o que encarece muito uma determinada ferramenta em caso de uma possível rejeição.

Em comparação aos processos convencionais de manufatura, a superfície usinada por essa técnica apresenta um padrão de acabamento ideal, denominado rugosidade, de acordo com as características físicas dos materiais a ser usinado, do eletrodo e da intensidade da corrente aplicada que são determinadas por um especialista.

Devido a variações de tensão na rede elétrica e outros fatores, os parâmetros indicados pelo fabricante tornam-se ineficientes, pois estes foram obtidos através de testes laboratoriais, surgindo assim novos parâmetros.

Outro fator relevante está na transferência, aposentadoria ou demissão deste especialista, podendo resultar na perda de todo o treinamento e conhecimento adquirido ao longo do tempo, implicando na formação ou contratação de outro profissional qualificado.

Este trabalho de dissertação tem como objetivo resolver este problema, resguardando a empresa do investimento aplicado a profissionais deste setor.

Para solucionar este problema é proposto o desenvolvimento de um Sistema Especialista Baseado em Conhecimento utilizando técnicas e metodologias de Inteligência Artificial cujo objetivo será armazenar e apresentar de forma otimizada todo o conhecimento heurístico e teórico adquirido, que antes somente o especialista possuía.

Este sistema deverá ter uma linguagem de fácil entendimento para o usuário, independente de sua capacitação profissional, possibilitando a introdução de novos conhecimentos, além da preservação e a padronização do processo estarem formalmente documentadas em sua base de conhecimento.

## 1.1 - Organização do Trabalho

No Capítulo 2 será apresentada uma revisão da literatura, abordando os seguintes temas: conceito de usinagem, processos não tradicionais de usinagem, enfatizando o processo de usinagem por descargas elétricas e seus princípios físicos e sistemas inteligentes, suas técnicas e metodologias de construção, com foco na construção de sistemas baseados em conhecimento.

No Capítulo 3 será relatado o problema da escolha dos parâmetros para a determinação da rugosidade ideal das superfícies usinadas pelo processo de usinagem por descargas elétricas.

No Capítulo 4, serão abordados os materiais e os métodos utilizados no desenvolvimento do trabalho.

No Capítulo 5 serão relatados os resultados obtidos e, finalizando, o capítulo 6 será dedicada à conclusão do trabalho proposto.

## Capítulo 2 – Revisão da Literatura

Neste capítulo será apresentada uma revisão da literatura, abordando os seguintes temas: conceito de usinagem, processos não tradicionais de usinagem, enfatizando o processo de usinagem por descargas elétricas e seus princípios físicos, sistemas inteligentes, suas técnicas e metodologias de construção, com foco na construção de sistemas baseados em conhecimento.

### 2.1- Conceito de Usinagem

Os processos de usinagem têm o objetivo de retirar uma porção de material pela ação de uma ferramenta de corte. O processo de usinagem tradicional ou convencional é representado por um grande número de máquinas operatrizes e ferramentas de corte e podem ser classificadas como: torneamento, aplainamento, furação, mandrilhamento, fresamento, serramento, roscamento e retificação.

Além dos processos convencionais existem também os processos não convencionais ou não tradicionais, que serão abordados a seguir.

### 2.2 - Métodos Não Tradicionais de Usinagem

A necessidade de usinar metais e ligas com alta resistência mecânica e dureza cada vez mais elevadas aliada à conveniência de redução de tempo e custos na produção levaram ao desenvolvimento de novas técnicas de usinagem.

Essas novas técnicas podem ser classificadas de acordo com o tipo de energia empregada no processo.

Em (CHIAVERINI, 1986), os processos classificam-se como:

- Processos baseados em energia mecânica, compreendendo jato abrasivo, jato d'água e ultra-sônico;
- Processos baseados em energia eletroquímica, compreendendo o processo eletroquímico;
- Processos baseados em energia química, compreendendo as reações químicas;

- Processos baseados em energia termoelétrica, compreendendo a descarga elétrica, Laser e Arco-plasma.

Nesta dissertação será abordado o processo de usinagem por descargas elétricas.

### 2.3 - Usinagem por Descargas Elétricas

As primeiras pesquisas e ensaios na tentativa de se usar através de descargas elétricas ocorreram por volta de 1700 (BROWN, 1991).

Com o início da segunda guerra mundial, vieram grandes dificuldades na obtenção de matérias-primas e exigência de aumento da produção industrial em curto prazo com o mínimo de desperdício.

Um grupo de cientistas chefiados por N. R. Lazarenko desenvolveu o processo EDM (*Electric Discharge Machining*), possibilitando sua comercialização resultando no processo de usinagem por eletroerosão.

Atualmente com o avanço da tecnologia podem-se encontrar máquinas de eletroerosão que permitem a usinagem com precisão de até 0,005mm.

O processo de usinagem por eletroerosão é muito complexo, tanto que os conhecimentos que se tem sobre o assunto vêm de experiências práticas, havendo, portanto, possibilidades de encontrar explicações contraditórias sobre o assunto.

O fenômeno da erosão neste processo ocorre por meio de descargas elétricas entre dois condutores de energia elétrica (peça e eletrodo), que estão submersos em uma solução dielétrica que irá reproduzir na peça uma cópia fiel com às suas características, mas ao inverso do eletrodo.

Normalmente a peça, esta fixada a mesa de coordenadas da máquina e o eletrodo no cabeçote porta-eletrodo, como mostra a figura 2.1.

O cabeçote é acionado por meio de um cilindro hidráulico controlado por um servomecanismo que controla a velocidade de avanço do eletrodo, mantendo uma distância entre o eletrodo e a peça denominada GAP, onde o potencial elétrico excede o limite do dielétrico em que a peça está imersa estabelecendo o arco voltaico. O GAP é resultante entre outros fatores da intensidade da corrente aplicada.

O servomecanismo recebe um impulso elétrico correspondente a diferença entre a voltagem desejada e a inicial. O sinal é amplificado e o eletrodo avança pelo

sistema hidráulico de controle. Se ocorrer um curto-circuito na região das descargas elétricas o servomecanismo inverte o sentido do movimento do avanço do eletrodo restabelecendo o correto controle da operação.

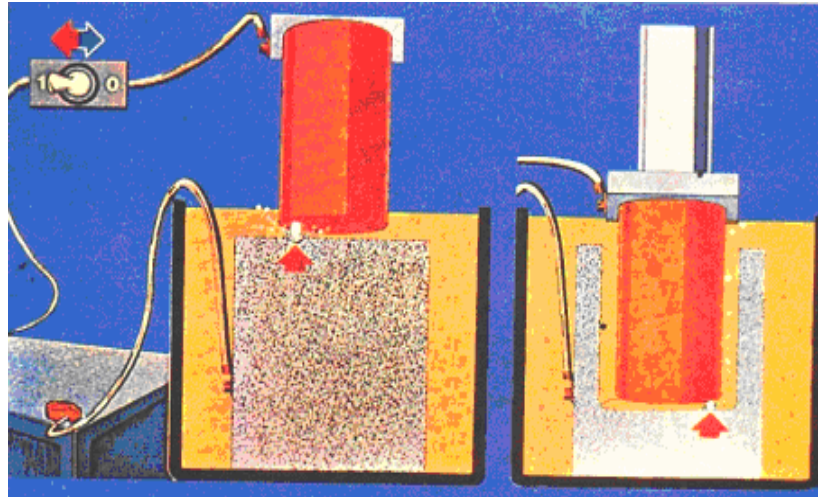


Figura 2.1 - Processo de usinagem por eletroerosão (SENAI, 1981).

Neste instante o dielétrico, que tem função de isolante, passa a ser condutor nas imediações do eletrodo, formando uma ponte entre a peça e o eletrodo, onde é provocada a descarga elétrica (centelhamento).

Esta centelha ou faísca possui um determinado tempo de duração, ajustado no painel da máquina em unidade de microssegundos, que é controlado através de comandos eletrônicos. Existe também uma pausa entre as descargas que é medida na mesma unidade de tempo.

Durante o impacto da faísca com a peça estima-se que, dependendo da intensidade da corrente aplicada, a temperatura na região da erosão pode variar de dois mil e quinhentos a cinquenta mil graus Celsius. A frequência das descargas poderá alcançar até duzentos mil ciclos por segundo (SENAI, 1981).

No decorrer do impacto dos elétrons com a superfície da peça a ser usinada, que acontece a uma temperatura elevada, o material desintegra-se em forma de minúsculas esferas.

Parte deste material é vaporizada ocorrendo á formação de gases, sendo que de 12% a 72% não são identificados. Entre os gases emitidos encontram-se: hidrogênio, metano, propano, acetileno e óxido de carbono.

## 2.4 - Princípios Físicos do Processo

O princípio básico de atuação do processo de usinagem por eletroerosão é a remoção controlada de pequenas partículas de material da peça através da fusão e evaporação do material fundido por meio de descargas elétricas de alta frequência entre o eletrodo geralmente anodo e a peça (catodo).

Como mencionado anteriormente, a peça a ser usinada e o eletrodo não entram em contato e a distância que os separa é preenchida por um liquido dielétrico, que inicialmente atua como isolante.

Esta distância ou GAP é determinada a principio por uma tensão inicial ou piloto. Ao ser aplicado uma tensão superior a inicial, cria-se um campo elétrico formado por partículas suspensas em toda a superfície geométrica do eletrodo e da peça.

Simultaneamente o eletrodo carregado positivamente emite partículas de carga positiva. Essas se chocam com as partículas neutras dentro do espaço intermediário (GAP), dividindo-se e formando assim partículas de carga positivas e negativas. Esta fase é denominada ionização por choque.

Nesta fase do processo a resistência isolante do dielétrico é vencida formando pontes condutoras ou canais de descargas que conduzem as partículas carregadas positivamente até a superfície metálica da peça. Este movimento provoca um aumento de pressão e temperatura formando uma bolha de vapor.

A fusão superaquecida evapora-se em forma explosiva levando todo o material fundido formando-se crateras como mostra a figura 2.2.



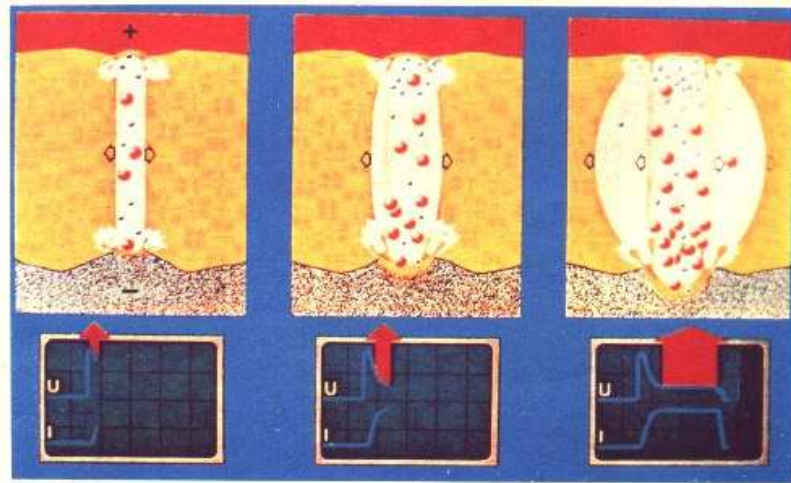


Figura 2.2 – Formação de crateras (SENAI, 1981).

Ao reduzir a corrente, reduz-se o fluxo de calor reduzindo o número de partículas carregadas eletricamente, cai a pressão e junto ao canal de descarga desfaz-se a bolha de vapor, deixando, finalmente, como resíduos, partículas metálicas e produtos desintegrados no líquido dielétrico que na maioria são carbono e gases.

Um fator de grande importância no processo é em relação à polaridade do eletrodo. Mediante intercâmbio de partículas carregadas negativamente e positivamente forma-se um canal de descarga. Conseqüentemente as partículas produzem calor e provocam a fusão do metal.

A quantidade de cargas elétricas positivas e negativas é resultante da duração dos impulsos da corrente. A quantidade de calor no eletrodo receptor é maior, quanto maior é o número de partículas de um tipo que se deslocar até ele. Importante ressaltar que o fato das partículas estarem carregadas positivamente, por ser em uma massa maior, produz mais calor a máximas velocidades de choque.

Com a finalidade de diminuir o desgaste dos eletrodos, determinam-se as polaridades do eletrodo e da peça de maneira que ela possa levar a maior quantidade de calor durante o tempo de descarga.

Quando se deseja obter impulsos de correntes curtos, liga-se o eletrodo ao pólo negativo e vice-versa.

Para se determinar qual a melhor polaridade usar em relação à peça e o eletrodo, faz-se necessário verificar as características físicas de ambos. Sabe-se que na

usinagem de aços com eletrodos de cobre a duração de impulso é de cinco milionésimos de segundo.

Assim como em todos os processos de usinagem, o tempo e a precisão são fatores de grande importância. Neste tipo de processo o tempo de trabalho é medido pelo volume de material a ser removido, em milímetros cúbicos por minuto.

A precisão do processo depende, entre outros fatores, do desgaste do eletrodo que é representada pela letra grega teta e com um “v” como coeficiente proporcional ( $\theta_v$ ), que indica a porcentagem de desgaste do eletrodo com o volume de remoção do material.

Semelhante ao processo de usinagem convencional, no processo por eletroerosão, não se obtém uma superfície completamente lisa, mas ligeiramente áspera.

Para padronizar esta aspereza foi criado um sistema de referência e medição de rugosidade cuja unidade de medição é o micron. No Brasil este padrão é denominado  $R_{max}$  e  $R_a$ . Na Alemanha e França estes valores são denominados por  $R_t$  e nos Estados Unidos,  $H_{max}$ , como mostra a figura 2.3.

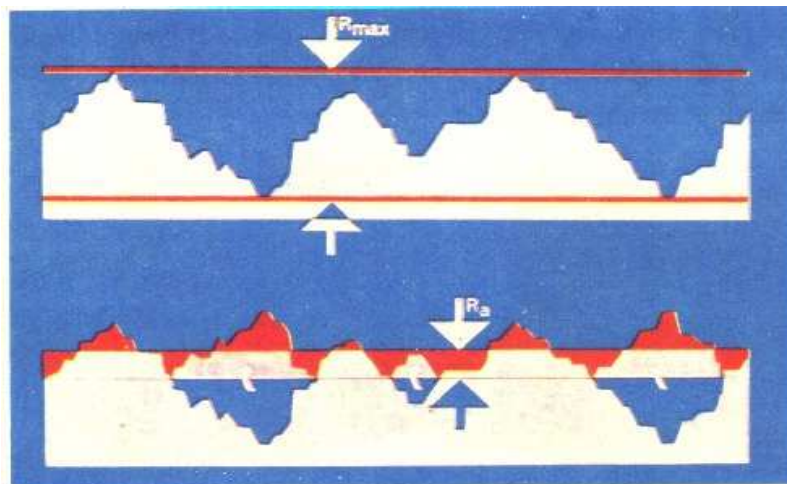


Figura 2.3 – Padrão de rugosidade (SENAI, 1981).

$R_{max}$  indica a profundidade máxima. É frequentemente usada quando a superfície após a usinagem for submetida a um processo de brunimento ou polimento.

Com  $R_a$ , determina-se o valor médio aritmético da rugosidade, o qual é muito importante quando se deseja trabalhar com pequenas tolerâncias e ajustes finos.

Deve-se notar então que antes de submeter-se a peça ao processo, é necessário primeiramente saber qual será sua aplicação.

Outro fator de grande importância é o alargamento que separa o eletrodo da peça. Esta folga é determinada pela intensidade da corrente e outros fatores.

Parte integrante e de muita importância em cada equipamento que realiza o processo de usinagem por descargas elétricas é o gerador. Este equipamento converte a corrente alternada procedente da rede elétrica e emite pulsos de tensão de forma regular, que através de dispositivos eletrônicos consegue-se ajustar a dimensão dos retângulos e as distancias entre os mesmos para corresponder ao trabalho desejado.

Nos geradores pode-se ajustar individualmente tanto a corrente de descarga, a largura dos pulsos e a distância entre eles. A figura 2.4 mostra o diagrama tensão / tempo.

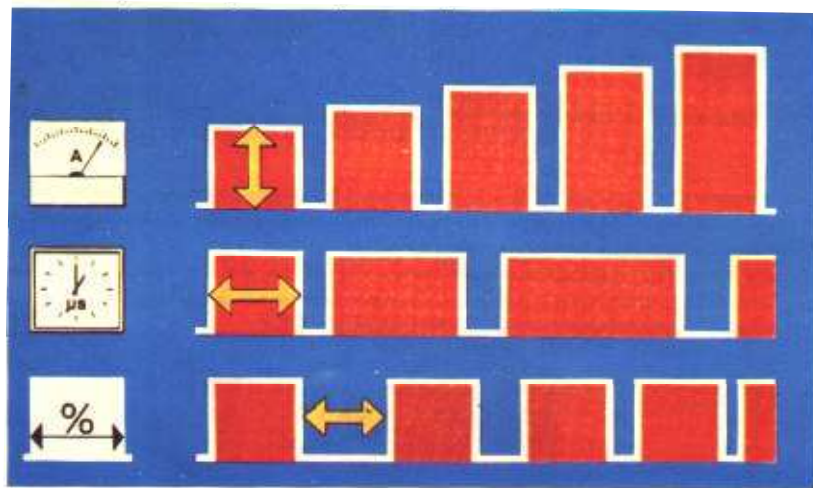


Figura 2.4 – Diagrama Tensão / Tempo (SENAI, 1981).

Cabe ressaltar que a duração do impulso e a intensidade da corrente são medidas pela milionésima parte de um segundo, enquanto a pausa é proporcional a sua duração.

Sabe-se que ao erodir com baixa corrente consegue-se uma pequena remoção de material, por outro lado, aumentando a capacidade de remoção de material, aumenta-se o desgaste do eletrodo.

Erodindo-se com pequena duração de impulso provoca um desgaste crescente no eletrodo e baixa remoção de material. Aumentando a duração dos impulsos, obtém-se um menor desgaste e maior remoção.

Na prática, utiliza-se para desbastar peças de aço eletrodo de cobre eletrolítico ou grafite com o controle eletrônico ajustado para uma duração de impulso que se encontre na sua capacidade máxima de remoção demandando o mínimo desgaste do eletrodo.

É importante destacar-se a grande importância do tempo de pausa entre duas descargas, durante o processo para a otimização do desgaste do eletrodo.

Para o ajuste, uma regra a ser estabelecida é que se obtém uma grande capacidade de remoção e pouco desgaste do eletrodo mediante pequenos períodos (pausas) nas descargas. Logicamente existem valores limites que se excedidos causaram perturbações no processo. A esse limite é dado o nome de Relação Palpada Limite.

Pode-se então concluir que aplicando uma energia ou descarga reduzida obtém-se uma rugosidade pequena e um maior desgaste do eletrodo e vice-versa.

Deve-se salientar mais uma vez que tudo depende de qual será a aplicação da superfície usinada, qual seu material, qual o material do eletrodo e sua rugosidade.

Dentro dessas premissas, escolhe-se qual os melhores ajustes para obter-se a máxima remoção de material, o mínimo de desgaste de eletrodo e a rugosidade desejada, seja para um simples desbaste quanto para um acabamento mais fino.

## 2.5 - Sistema de Limpeza

O sistema de limpeza ou lavagem é ponto importantíssimo na usinagem por descargas elétricas.

Conforme estabelecido nas considerações feitas nas seções anteriores o processo ocorre dentro de um líquido dielétrico cuja função é, entre outras, retirar partículas removidas da superfície da peça da área erodida. Se a escolha do sistema de limpeza não estiver correto, a remoção do material será ineficiente.

Devido a esta razão, foram providos a esses equipamentos alguns processos de lavagem reguláveis, tanto em pressão (injeção), como aspiração (sucção), utilizando-se válvulas e manômetros.

## 2.6 - Fluídos Dielétricos

Os tipos de fluídos dielétricos mais utilizados no processo de usinagem por eletroerosão são: óleos minerais, querosene, óleos à base de silicone, água desionizada e líquidos polares, tais como soluções aquosas de glicóis etilênicos.

O fluído dielétrico circula através da região das descargas elétricas, alimentadas por meios de furos ou rasgos na peça ou no eletrodo pelas técnicas abordada no tópico anterior (pressão / sucção ou ambos). Suas principais funções são: remover as pequenas partículas da erosão da peça e do eletrodo, refrigeração do eletrodo para evitar a fusão do mesmo com a peça e a refrigeração da peça para manter um correto controle dimensional.

O fluído dielétrico deve ter uma adequada resistência dielétrica, em torno de 20KV/cm segundo alguns fabricantes e ser facilmente ionizado para permitir a condução da corrente elétrica (MANUAL DE OPERAÇÃO E INSTALAÇÃO ENGEMAQ, 1999).

Em seu circuito de circulação o fluído é continuamente purificado por meio de filtros apropriados. A remoção completa das partículas sólidas em suspensão não é sempre necessária principalmente em operações de desbaste, com distâncias relativamente grandes entre o eletrodo e a peça. Tais partículas facilitam a passagem de maior corrente elétrica, sem aumentar a voltagem.

As principais propriedades que um bom fluído dielétrico deve apresentar são: boa resistência dielétrica, baixa viscosidade, alto ponto de inflamação, não corroer o equipamento e não afetar o operador.

## 2.7 - Considerações Finais e Aplicações do Processo

Outro fator de grande importância está no aspecto das superfícies usinadas por este processo. Sua grande homogeneidade na formação de crateras ou rugosidade deixa-se facilmente polir, diferentemente de outro processo de usinagem convencional.

Um outro ponto que deve ser observado está nas características mecânicas, estruturais e metalográficas que tanto preocupa os metalurgistas, como as alterações das camadas, resultante dos efeitos combinados da pressão e do aquecimento que acompanha todas as usinagens por formação de cavacos, traduzidas por compressões e

tracionamentos sobre os cristais da matéria podem provocar modificações estruturais e formação de rachaduras.

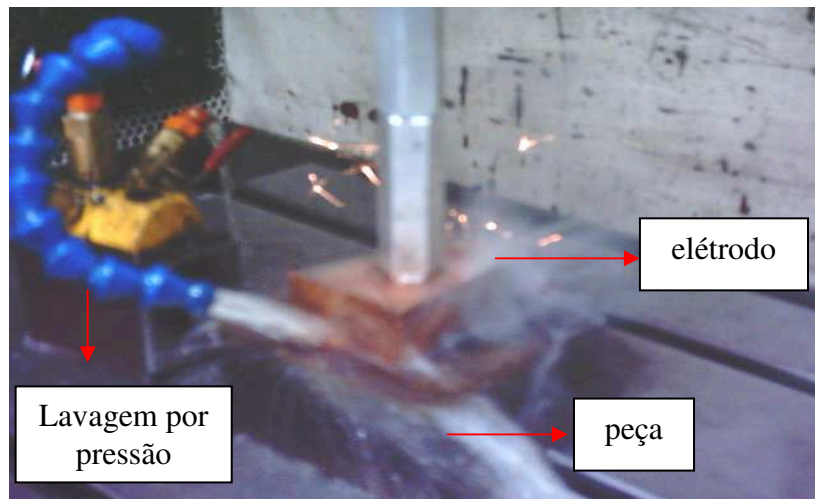


Figura 2.5 – Eletroerosão por Penetração.

Todos esses fatores mencionados acima não acontecem no processo de usinagem por descargas elétricas. Mesmo o efeito térmico não exerce modificações estruturais em virtude das descargas serem relativamente baixas e curtas.

Percebe-se, porém uma ligeira modificação (endurecimento) na estrutura da camada vizinha quando se trata de desbastes, onde a energia de descarga é um pouco mais elevada, mas sem efeito perturbador, que tende a desaparecer logo em seguida à operação de acabamento.

Nota-se também que permanece um certo endurecimento superficial que em nada modifica as propriedades mecânicas e, ao contrário, exerce papel de proteção á camada.

Estudos e pesquisas feitas pela indústria aeronáutica, que deve ter sempre o cuidado de evitar qualquer tipo de micro-rachaduras e modificações estruturais nos elementos que empregam na construção de aeronaves levaram a se ter certeza que tais perigos não existem com a aplicação do processo nas peças que compõe as aeronaves (FERRARESI, 1975).

Alguns materiais chamados de exóticos (Hastalloy, Nitralloy, Waspalloy e Nimonic) dos quais a indústria aeronáutica e espacial faz uso abundante são usinados facilmente pelo processo de eletroerosão.

Além das aplicações mencionadas anteriormente, o processo de usinagem por descargas elétricas pode usinar ferramentas de aço temperado sem originar nenhuma deformação, ao contrario da usinagem por meios convencionais onde se usina o material em estado mole e, após o tratamento térmico, há considerável liberação de tensões e deformações. Dentre a ferramentas citadas estão: matrizes para moldes plásticos, moldes de borracha, matrizes para trefilação, extrusão, matrizes para estamparia, forjaria, pastilha de carboneto, stellite, muito utilizados nas indústrias de um modo geral.

A figura 2.5 da página anterior mostra uma visão geral dos componentes que fazem o processo.

## 2.8 - Sistemas Inteligentes

Na era do conhecimento, o nível de capacitação do indivíduo e da empresa é fator determinante para sua sobrevivência. A tecnologia atual aproxima as pessoas e possibilitam que a informação e conhecimentos possam ser trocados com facilidade.

A complexidade do processo deve-se ao fato de que o valor não estará mais no domínio da informação, mais sim em como trabalhar com o conhecimento relacionado com esta informação. Sistemas inteligentes são exemplos de sistemas que utilizam a tecnologia da informação para manipular conhecimentos especializados.

Durante as três últimas décadas, pesquisadores de Inteligência Artificial foram aprendendo a apreciar o valor do conhecimento específico do domínio como requisito indispensável na resolução de problemas complexos.

Os computadores têm algumas vantagens sobre os seres humanos, principalmente no que diz respeito à velocidade e consistência como executam determinadas funções. Para fazer um processador de símbolos desempenhar uma tarefa tão bem quanto um especialista humano, alguém terá que muni-lo de conhecimento especializado, comparável ao que um especialista humano possui. É fundamental que tal processador tenha um desempenho rápido e consistente.

Os avanços de *hardware* e *software* possibilitaram a construção de ferramentas e técnicas baseadas em conhecimento. Os Sistemas Baseados em Conhecimento estão na vanguarda dessa nova geração de técnicas e ferramentas.

A importância da construção de Sistemas Baseados em Conhecimento para as diversas organizações encontra-se na capacidade desses sistemas de preservar, aproveitar e fazer uso de recursos cada vez mais valiosos: o talento e a experiência dos membros da organização no processo de tomada de decisões.

A busca da viabilização da transferência do conhecimento para o computador constitui um campo de pesquisa denominada Inteligência Artificial, com proposta de desenvolvimento de Sistemas Inteligentes capazes de simular ou emular o processo de decisão do ser humano.

## 2.9 - Diferenças entre Sistemas Convencionais e Sistemas Baseados em Conhecimento

A primeira diferença a ser destacada está relacionada com a forma em que os dados são organizados. Enquanto em sistemas convencionais os dados são organizados por meio de estruturas de dados, nos Sistemas Baseados em Conhecimentos os dados são organizados por meio de representação de conhecimento.

A segunda diferença complementa a primeira, ou seja, enquanto estruturas de dados apenas representam os dados e suas relações, representações do conhecimento explicitam os conceitos do domínio do problema, suas relações e as regras de deduções durante o processo de resolução do problema.

A terceira diferença diz que os sistemas convencionais normalmente usam algoritmos para realizar suas funções. Já os Sistemas Baseados em Conhecimento utilizam métodos de resolução de problemas que realizam busca em um espaço de possíveis soluções e fazem uso de conhecimento heurístico.

A quarta e última diferença enfatiza que em sistemas convencionais, o conhecimento para a resolução de um problema está embutido no código do programa, tornando sua inspeção, seu entendimento e sua modificação um processo complicado. Já os Sistemas Baseados em Conhecimento, o conhecimento é representado explicitamente e separado do programa que o manipula e interpreta. Desta forma, os Sistemas Baseados



em Conhecimento tornam muito mais fácil entender o conhecimento usado para a resolução de problemas, assim como a sua modificação (RESENDE, 2003).

## 2.10 - Diferenças entre Sistemas Especialistas e Sistemas Baseados em Conhecimento

Conceitualmente, existe uma diferença entre um Sistema Especialista e um Sistema Baseado em Conhecimento.

Enquanto os Sistemas Especialistas armazenam em sua base conhecimento eminentemente heurístico, os Sistemas Baseados em Conhecimento incluem em sua base além do conhecimento heurístico, o conhecimento também disponível na literatura, assim Sistemas Baseados em Conhecimento podem ser classificados como Sistemas Especialistas quando o desenvolvimento do mesmo é voltado para aplicações nas quais o conhecimento a ser manipulado é voltado para um problema específico e conta com um alto grau de especialização.

Para (KRISHNAMOORTHY & RAJEEV, 1996), Sistemas Especialistas Baseados em Conhecimentos (KBES) é a primeira realização de pesquisas no campo da Inteligência Artificial (IA) a se consolidar como tecnologia de *software*.

Tarefas pertencentes à categoria de classificação e diagnóstico foram as primeiras a se beneficiar com a tecnologia emergente dos sistemas especialistas baseados em conhecimentos.

Partindo desta filosofia pode-se concluir que tanto os sistemas especialistas quanto os sistemas baseados em conhecimento manipulam conhecimento e informação de forma inteligente e são desenvolvidos para serem usados em problemas que necessitam de uma quantidade de conhecimento e de especialização humana.

Os Sistemas Baseados em Conhecimento tem como características principais uma base de conhecimento e um mecanismo de raciocínio capaz de realizar inferências sobre esta base e obter conclusões a partir deste conhecimento.

A importância da construção de Sistemas Baseados em Conhecimentos aplicados nos mais variados setores reside na capacidade desses sistemas em prever, aproveitar e fazer uso do talento e experiência dos especialistas em busca de soluções nos mais variados domínios de conhecimento.

Além da capacidade de raciocínio sobre a base de conhecimento e o tempo que é utilizado para a solução de um determinado problema, a heurística é outro fator de extrema importância no desenvolvimento do sistema.

Pode-se definir heurística como o conhecimento de regras práticas que auxiliam na redução de esforços na busca por soluções. A qualidade da heurística depende fundamentalmente da experiência dos especialistas na resolução de problemas.

Deve-se ressaltar que para construir um Sistema Baseado em Conhecimento é necessário um estudo da viabilidade da aplicação dessa tecnologia no domínio em questão. Alguns fatores a serem considerados são: custo, habilidade, disponibilidade do especialista e delimitações do domínio em questão.

Os Sistemas Baseados em Conhecimentos podem ser aplicados na realização das seguintes tarefas:

- **Interpretação:** Consiste na análise de dados para determinação de seu significado. Ex: Processamento de imagens.
- **Classificação:** Consiste na determinação de falhas em um sistema, dado um conjunto de sintomas. Ex: Determinação de falhas em máquinas.
- **Monitoramento:** Consiste na observação contínua do comportamento de um sistema a fim de realizar ações quando alguma situação específica acontece. Ex: Tráfego aéreo.
- **Planejamento:** consiste na determinação da seqüência de ações que devem ser realizadas para atingir alguma meta. Ex: Planejamento de operações com robôs.
- **Projeto:** Consiste no desenvolvimento das especificações de um objeto, de maneira a satisfazer um dado conjunto de requisitos. Ex: Associação de um Sistema Baseado em Conhecimento e um sistema CAD para projetar tubulações em um Boeing.

As principais técnicas e metodologias usadas para o desenvolvimento de sistemas inteligentes são: Aquisição de Conhecimento, Aprendizado de Máquina, Redes Neurais, Lógica Fuzzy, Computação Evolutiva, Agentes e Multiagentes, Mineração de Dados e Textos (RESENDE, 2003).

Nesta dissertação serão abordadas a técnica e a metodologia da Aquisição de Conhecimento para o desenvolvimento do sistema proposto neste trabalho.

## 2.11 - Estrutura Geral de um Sistema Baseado em Conhecimento

Os principais módulos que compõem um Sistema Baseado em Conhecimento são: Núcleo do Sistema Baseado em Conhecimento ou *SHELL*, Base de Conhecimento, Memória de Trabalho, Base de Dados e Interface.

Cabe lembrar que nem todos os Sistemas Baseados em Conhecimento apresentam a mesma estrutura, contudo apresentam estrutura semelhante.

O Núcleo do Sistema Baseado em Conhecimento ou *SHELL* é responsável pelas principais funções do sistema como o controle da interação com o usuário, o processamento do conhecimento, justificativas ou explicações das conclusões obtidas a partir do raciocínio e pelos mecanismos de inferência.

A Memória de Trabalho é o local no qual são registradas todas as respostas fornecidas pelo usuário durante a interação realizada no sistema, assim como são registradas todas as conclusões e a seqüência de raciocínio.

A Interface é responsável pela interação entre o usuário e o sistema. Quanto mais próxima essa linguagem for da linguagem do usuário, mais fácil será a utilização do sistema.

O Núcleo do Sistema Baseado em Conhecimento ainda é composto de três módulos com funções específicas: Módulo Coletor de Dados, Módulo de Inferência e Módulo de Explicações.

O Módulo Coletor de Dados é responsável pela interação com o usuário, obtendo informações do problema em questão, através de formulação de perguntas ao usuário.

O Módulo de Inferência é o responsável pelo desenvolvimento do raciocínio baseado em algoritmos para manipular as informações obtidas pelo Módulo Coletor de Dados e pelo conhecimento representado na Base de Conhecimento.

O Módulo de Explicações é o responsável pelas explicações ou justificativas das conclusões obtidas e dos motivos pelos quais o Sistema Baseado em Conhecimento faz determinadas perguntas do tipo: porque, como, o que acontece se, por que não e etc.

O Usuário do sistema normalmente é alguém sem experiência ou necessita de algum treinamento.

A Base de Conhecimento será comentada com detalhes no capítulo 3 deste trabalho.

## 2.12 - Representação do Conhecimento

A Representação do Conhecimento é definida como uma forma sistemática de estruturar e codificar o que se sabe de uma aplicação. O conhecimento pode ser representado através das seguintes técnicas: Regras de Produção, Redes Semânticas, Frames e etc.

A Representação do Conhecimento pode ser organizada e configurada em diferentes bases para proporcionar uma rápida inferência (raciocínio).

Como mencionado existem algumas técnicas para representar o conhecimento e neste trabalho de dissertação, será aplicada Regras de Produção para a representação do domínio em questão.

## 2.13 - Metodologia e Técnicas Aplicadas em Regras de Produção

Conforme (TURBAN & ARONSON, 2001), Regras de Produção é uma técnica que consiste em uma forma natural de simular, modelar e representar o conhecimento de um especialista humano através de estruturas do tipo *SE* <condição, premissa ou antecedente> ocorrer, *ENTÃO* <conclusão, resultado, consequência ou ações>.

Assim quando uma das condições da lista é verificada e todas forem satisfeitas, as conclusões são consideradas verdadeiras e as ações serão executadas até o objetivo ser alcançado.

Cabe ressaltar que na programação baseada em regras de produção, utiliza-se o motor de inferência para manipular os fatos e as regras contidas na memória de trabalho com o domínio do conhecimento contido na base de conhecimento, para se efetuar uma conclusão.

Existem ainda algumas linhas de raciocínio que podem ser seguidas pelos Sistemas Baseados em Conhecimentos. Por exemplo, no caso de regras de produção, podem ser:

- Encadeamento para frente (*Forward Chaining*);
- Encadeamento para trás (*Backward Chaining*).

Conforme (LEVINE, 1988), usa-se a expressão “para frente”, quando a condição vem antes da conclusão como mostra no exemplo abaixo:

Regra 1:

**SE** o motor superaquecer, **ENTÃO** o carro vai enguiçar.

Regra 2:

**SE** o carro enguiçar, **ENTÃO** vai me custar muito dinheiro e vou chegar tarde em casa.

No encadeamento “para trás”, o resultado já aconteceu e o objetivo é descobrir a sua causa. Seguindo o exemplo acima:

Regra 1:

**SE** o carro não estiver regulado e a bateria estiver fraca, **ENTÃO** não passará corrente pela ignição.

Regra 2:

**SE** não passar corrente suficiente pela ignição, **ENTÃO** o carro não vai pegar.

## 2.14 - Desenvolvimento de um Sistema Baseado em Conhecimento

Existem vários estágios em um processo de desenvolvimento de um Sistema Baseado em Conhecimento. Resumidamente eles são citados como: estudo das possibilidades, prototipação rápida, refinamento do sistema, teste preliminar do sistema, qualidade, manutenção e evolução.

Um fator de extrema importância no processo de construção de um Sistema Baseado em Conhecimento é a identificação das características do domínio do conhecimento. A partir do conhecimento do problema em questão, é realizada uma avaliação para verificar a necessidade e viabilidade de se utilizar esta tecnologia.

Em caso positivo, as fases para o desenvolvimento de um Sistema Baseado em Conhecimento são: planejamento, aquisição de conhecimento, implementação e testes.

### 2.14.1 - Planejamento de um Sistema Baseado em Conhecimento

Nesta etapa, define-se um conjunto de objetivos dentre eles: o tipo de problema a solucionar e ser capaz de descrevê-lo em termos concretos, seleção da equipe de desenvolvimento do sistema e especificação da linguagem de representação do conhecimento.

### 2.14.2 - Aquisição de Conhecimento

O grande desafio na construção dos Sistemas Baseados em Conhecimento está na criação de suas bases de conhecimento. Isto fez surgir um novo profissional conhecido como Engenheiro de Conhecimento.

O Engenheiro de Conhecimento tem por função estudar o domínio em questão, através da interação com o especialista da área e criar um modelo do domínio e das tarefas que necessitam ser representadas.

Defini-se aquisição de conhecimento como um processo de extração, estruturação e organização do conhecimento relacionada a tarefas de um determinado domínio. Já que esta fase do desenvolvimento ainda é artesanal é conhecida como “gargalo” na construção dos Sistemas Especialistas (RESENDE, 2003).

O processo de aquisição de conhecimento ou Processo de Engenharia de Conhecimento, como é chamado por alguns autores, está dividido em cinco etapas: identificação, conceituação, formalização, implementação e testes.

Na etapa de identificação o objetivo é definir o escopo de atuação, a classe dos problemas envolvidos, o tipo de tecnologia utilizada e a viabilidade técnica e econômica da construção do sistema.

Para isto, o engenheiro de conhecimento deve pedir ao especialista a indicação de bibliografias do domínio, documentos, fazer entrevistas, para ter uma idéia da complexidade, formulando assim um modelo de interação sistema-usuário.

Na etapa de conceituação, o engenheiro de conhecimento começa a formular conceitos, suas relações entre si, o que deve ser representado computacionalmente e o que não pode ser. Para isto, o engenheiro de conhecimento realiza entrevistas com o especialista, formulando questões baseadas em pesquisas bibliográficas, documentos e

pode observar o especialista atuando no chão de fábrica, se for o caso, e definir quais serão os dados de entrada e saída.

Na etapa de formalização, o engenheiro de conhecimento faz a modelagem computacional do problema, ou seja, define qual a melhor técnica para representação do conhecimento, como frames, redes semânticas, regras de produção e etc.

Deve-se ressaltar que tal escolha deve ser adequada para representar os conceitos e as relações do domínio, representar a inferência requerida na tarefa e a eficiência para adquirir e modificar o conhecimento representado.

Na etapa correspondente a implementação, o engenheiro de conhecimento selecionará a linguagem na qual será codificado de forma expressiva o conhecimento requerido na formalização.

O engenheiro de conhecimento pode optar por alguma linguagem de programação como Lisp ou Prolog, ou ainda utilizar ferramentas denominadas *Shells*, especialmente projetadas para facilitar a construção dos Sistemas.

Como resultado, após esta fase, obtém-se um protótipo que deverá ser validado pelo especialista.

Por último, na etapa referente aos testes, o engenheiro de conhecimento avalia junto ao especialista a funcionalidade do sistema. Nesta fase não existem técnicas definidas para efetuar os testes que devem ser aplicados ao sistema.

Pesquisas indicam que a técnica mais indicada é deixar o sistema funcionando no ambiente onde será utilizado.

## 2.15 - Ferramentas de Suporte na Construção de Sistemas Baseados em Conhecimento

Pode-se facilitar a construção dos Sistemas Baseados em Conhecimento utilizando-se uma ferramenta baseadas nas linguagens LISP, PROLOG ou uma linguagem orientada a objeto. Essas ferramentas estão divididas em dois grupos:

- Ferramentas de Apoio: normalmente vários tipos de representação de conhecimento, monitoramento de inferência, assim como interface para Aquisição de Conhecimento. Ex: ART, *Babylon*, *KEE*, *Knowledge Craft*, *Loops*, *Flex*, *Elements Enviroment*.

- Shell: geralmente oferecem um esquema de Representação de Conhecimento e Motor de Inferência. Ex: *Insight*, KES, MED2, M.1, CLIPS, *Personal Consultant*, S.1, Timm, *Expert SINTA*.

## 2.16 - Técnicas de Aquisição de Conhecimento

Como foi dito anteriormente, a aquisição de conhecimento é considerada como o “gargalo” na construção dos sistemas inteligentes destacando-se que esta fase da construção ainda é artesanal e subjetiva.

Muito se tem feito para sistematizar ou automatizar o processo de aquisição de conhecimento, podem-se citar:

- Técnicas de aquisição de conhecimento manuais baseadas em entrevistas, em acompanhamentos ou modelos;
- Técnicas de aquisição semi-automáticos baseados em teorias cognitivas ou em modelos existentes;
- Tecnologia de aprendizado de máquina;
- Tecnologia de mineração de dados;
- Tecnologia de mineração de textos.

Neste trabalho de dissertação, serão abordadas as técnicas manuais baseadas em descrições, entrevistas estruturadas e semi-automáticas baseadas em reuso da representação e dos mecanismos de inferência, por terem sido aplicadas no desenvolvimento do sistema proposto.

### 2.16.1- Aquisição de Conhecimento Baseado em Descrições

Esta técnica consiste na aquisição de conhecimento através da análise e estudo de documentos e referências bibliográficas sobre o domínio ou ainda de alguns exemplos previamente cadastrados.



É responsabilidade do engenheiro de conhecimento adquirir os conhecimentos, através dos meios mencionados e também principalmente através do especialista, para depois codificá-los em uma base de conhecimento.

### 2.16.2 - Aquisição de Conhecimento Baseado em Entrevistas Estruturadas

Esta técnica ainda hoje é a mais comum, pois envolve o diálogo direto entre o especialista e o engenheiro de conhecimento. Contudo, não se dispensa uma consulta bibliográfica para um melhor entendimento do problema.

Depois de coletadas por meio convencional tal como questionários, as informações serão analisadas e modeladas (RESENDE, 2003).

Este tipo de abordagem pode ser aplicado nas fases de identificação e conceituação, onde é definida a descrição do domínio, fazendo com que exista uma comunicação organizada entre o engenheiro de conhecimento e o especialista.

Esta técnica tem como objetivo reduzir a subjetividade obtendo uma descrição da tarefa, do domínio em questão e uma descrição de suas limitações.

A figura 2.6 dá uma idéia esquemática dos métodos manuais mencionados anteriormente.



Figura 2.6 – Aquisição e Representação do Conhecimento

### 2.16.3 - Aquisição de Conhecimento Baseado no Reuso da Representação e dos Mecanismos de Inferência

Nesta técnica, aplica-se uma ferramenta computacional conhecida como *Shell*, que tem o objetivo auxiliar o engenheiro de conhecimento, o especialista ou o próprio usuário a construir a base de conhecimento, tornando o processo mais rápido.

Tal ferramenta oferece facilidades na aquisição do conhecimento, pois utilizam uma linguagem abstrata para descrição de regras e um mecanismo de geração automática da interface com o usuário final.

Ressalta-se que é necessário analisar a forma de representação. O mecanismo de inferência utilizada por um determinado Sistema Baseado em Conhecimento poderá ser reutilizado no domínio em questão.

## 2.17 - Considerações e Aplicações de Sistemas Inteligentes

Apesar dos computadores serem mais rápidos que os seres humanos no processamento de informações assim como em outras funções, para que o mesmo consiga desempenhar tarefas que só os humanos conseguem fazer, deve-se muni-los dos devidos conhecimentos para efetuar os processamentos desejados.

Com o avanço da tecnologia está sendo possível o desenvolvimento de ferramentas que dotadas de conhecimentos especializados podem desempenhar funções que antes somente as pessoas desempenhavam dentro dos seus departamentos.

Os sistemas baseados em conhecimento estão na vanguarda dessa geração de novas técnicas e ferramentas.

A importância dos sistemas baseados em conhecimento para as mais variadas organizações e seus departamentos encontra-se na capacidade desses sistemas de preservar, aproveitar e fazer uso de recursos cada vez mais valiosos: o talento e a experiência dos seus especialistas em todos os seu setores.

Durante a construção dos sistemas, os conhecimentos técnicos e heurísticos dos especialistas são capturados, organizados e disponibilizados em uma base de conhecimento.

Uma vez construído estes conhecimentos se tornam permanentemente acessíveis, facilmente recuperáveis e podem ser utilizados por qualquer usuário, independente de sua capacitação. As principais vantagens da aplicação dos sistemas especialistas são:

- Aumento da produtividade;
- Aumento no processamento e qualidade do produto;
- Redução do tempo ocioso;
- Armazenamento e recuperação do conhecimento;
- Habilidades para resolver problemas complexos;
- Realizam trabalhos em ambientes de grande perigo;
- Transferência de conhecimentos para locais remotos.

A seguir, cita-se alguns exemplos de aplicação de Sistemas Inteligentes na engenharia de um modo em geral:

- ANEXO A – Nariz Artificial;
- ANEXO B – Diagnóstico de Falhas de Transformadores;
- ANEXO C – Aplicação de Redes Neurais Artificiais em Laminação;
- ANEXO D – Fusão de Sensores;
- ANEXO E – Sistema Especialista para Otimizar Processos de Usinagem e Aumentar os Lucros;
- ANEXO F – Desenvolvimento de Protótipo de Sistema Especialista para Escolha do Tipo de Fundações.

## Capítulo 3 - Proposição

Neste capítulo serão abordados todos os parâmetros que devem ser controlados pelo especialista para a determinação da rugosidade ideal.

### 3.1 - O Problema da Escolha dos Parâmetros de Rugosidade

O estudo a ser desenvolvido é o resultado de uma série de entrevistas e discussões realizadas com o especialista em usinagem por descargas elétricas, do qual o conhecimento foi elicitado.

A escolha dos parâmetros para a determinação da rugosidade no processo de usinagem por descargas elétricas é a fase mais complexa do processo, pois envolve uma série de conhecimentos heurísticos e teóricos contidos em manuais técnicos fornecidos pelos fabricantes de cada equipamento.

Acontece que os conhecimentos disponíveis nos manuais tornam-se ineficientes, pois estes são obtidos em condições laboratoriais de teste o que não ocorre no chão de fábrica.

Variações de tensão na rede elétrica, condições inadequadas de instalação, desgastes dos componentes eletrônicos, fazem surgir novos parâmetros, prevalecendo a experiência adquirida pelos especialistas em cada situação.

É recomendado pelos fabricantes de alguns equipamentos que o especialista faça um relatório de acompanhamento de cada operação, para encontrar as melhores condições possíveis em termos de velocidade de usinagem, menor desgaste do eletrodo e menor rugosidade.

O que normalmente acontece é que os novos parâmetros e conhecimentos não são registrados pelo especialista durante a sua permanência na empresa, daí a necessidade de um Sistema Especialista para solucionar este problema.

Outros fatores que dificultam a determinação destes parâmetros esta na perda deste manual, transferência, aposentadoria ou demissão do especialista, ocasionando prejuízo na produção.

A escolha dos parâmetros para determinação da rugosidade ideal para cada superfície usinada é de extrema importância, pois ela é fator determinante para as diversas formas de aplicação e utilização deste processo.

De um modo geral os parâmetros definidos na utilização deste processo são os seguintes:

- Seleção do material a ser usinado;
- Seleção do material do eletrodo;
- Valor da Rugosidade;
- Determinação da intensidade da corrente;
- Determinação do tempo do impulso (Ton);
- Determinação do tempo de pausa (Toff);
- Determinação da polaridade;
- Gap;
- Remoção de material x desgaste do eletrodo;
- Sistema de limpeza.

A seguir, serão mencionados com mais detalhes os respectivos parâmetros.

### 3.1.1 - Material a Ser Usinado

O material a ser usinado é especificado no projeto de acordo com a aplicação. Teoricamente todos os materiais condutores de eletricidade podem ser usinados. Os mais utilizados pela indústria no chão de fábrica são o aço e pastilha de carboneto.

### 3.1.2 – Material do Eletrodo

Em se tratando de eletrodos, os materiais mais utilizados na sua confecção são: cobre eletrolítico, grafite e, em raras ocasiões, o cobre tungstênio (usinagem de pastilha de carboneto), por questões de custo.

Geralmente na maior parte dos trabalhos executados nesta área utiliza eletrodos de cobre eletrolítico.

Uma vez definido o tipo de material a usinar, o material do eletrodo e a rugosidade, o especialista determina a intensidade da corrente.

### 3.1.3 – Rugosidade

Entende-se por rugosidade a cratera que contém uma certa profundidade, produzida por um pulso de corrente e tem como unidade básica o micrón.

Sua profundidade é controlada por instrumentos óticos ou eletrônicos nos laboratórios de metrologia (rugosímetro).

No chão de fábrica, geralmente o especialista elabora uma régua como amostra de alguns estados de acabamento normalizado. Isto facilita a visualização e a escolha da regulagem padrão.

### 3.1.4 - Intensidade da Corrente

A escolha dos parâmetros de intensidade da corrente ou amperagem de trabalho pelo especialista é realizada a partir da secção do eletrodo que estará exposta ao centelhamento, ou seja, a área de contato frontal do eletrodo em relação à área a ser usinada.

De acordo com o material de que são constituídos o eletrodo e a peça, existem valores adequados para a aplicação da amperagem, em função da superfície frontal, como mostra a tabela 3.1 (SENAI, 1981).

Tabela 3.1 – Tabela de valores para o cálculo de amperagem

Eletrodo	Material a usinar	Amperagem
Cobre	Aço	0,07 A/mm <sup>2</sup>
Grafite	Aço	0,01 A/mm <sup>2</sup>
Cobre Tungstênio	Aço	0,14 A/mm <sup>2</sup>
Cobre Tungstênio	Pastilha de Carboneto	0,05 A/mm <sup>2</sup>

A seguir é exemplificado o cálculo de amperagem para um processo com as seguintes características:

- Material do eletrodo: cobre eletrolítico;
- Material da peça a ser usinada: aço.

O perfil do eletrodo para o cálculo da área é dado conforme a figura 3.1.

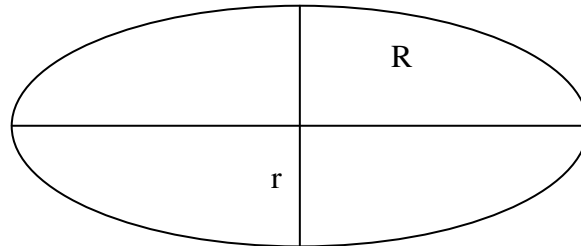


Figura 3.1 - Elipse

Calculo da área:  $S = \pi * R * r$

$R = 16,946 \text{ mm}$ ,  $r = 6,9461 \text{ mm}$ ,  $\pi = 3,14159$  portanto:

$S = \pi * 16,946 * 6,946$

$S = 369,786 \text{ mm}^2$

Com base na tabela acima se tem que para usinagem de cobre eletrolítico e peça de aço o valor máximo de amperagem que pode ser aplicado é:

$$369,786 \text{ mm}^2 * 0,07 \text{ A/mm}^2 = 25,885 \text{ A}$$

A determinação da amperagem aplicada tem importante influência no processo de usinagem sendo que dela surge o fenômeno denominado *GAP*.

Nota-se que quanto maior a intensidade da corrente aplicada, maior será a velocidade de remoção de material, maior desgaste do eletrodo, maior rugosidade e maior o valor do gap.

### 3.1.5 - Tempos de Impulso e Pausa ( Ton / Toff )

A escolha dos tempos de impulso e pausa tem também fundamental importância no processo. Os tempos de impulso e pausa são gerados por um gerador, equipamento que converte a corrente alternada e emite impulsos de tensão contínua de forma retangular.

Os tempos de impulso (Ton) correspondem aos tempos de descarga da corrente sobre o eletrodo e os tempos de pausa (Toff), correspondem à interrupção do fluxo da corrente entre uma descarga e outra.

Na usinagem com impulsos curtos, provoca-se um desgaste crescente no eletrodo, menor comprimento da faísca, menor rugosidade e por consequência menor velocidade de remoção de material.

Cabe ressaltar que o desgaste do eletrodo é dado em porcentagem e representa a relação da quantidade de material retirado na peça. Já a remoção de material é medida em mm<sup>3</sup>/min, ou seja, o volume de material removido por minuto.

Existem certas situações no chão de fábrica em que estas relações são mais importantes do que a qualidade da superfície usinada, ou seja, a rugosidade.

Outro fator de grande importância é a determinação da polaridade do eletrodo. Para usinagem com impulsos longos, determina-se a polaridade positiva para o eletrodo e negativa para a peça.

Sabe-se que na usinagem de aços com eletrodos de cobre, o limite de duração dos impulsos é de aproximadamente cinco milionésimos de segundo.

Esses parâmetros são determinados pelo especialista individualmente, de acordo com as características físicas do material do eletrodo e peça a usinar.

### 3.1.6 – Gap

Outro fator de grande importância é a determinação do GAP ou folga provocado pelo comprimento da faísca entre o eletrodo / peça como mostra a figura 3.2. O GAP calculado de forma errônea pode comprometer a aplicação para qual a peça fora projetada.

Para calcular o dimensionamento do eletrodo em função da rugosidade que se deseja obter, independente do material, o especialista utiliza a fórmula descrita abaixo da figura 3.2:



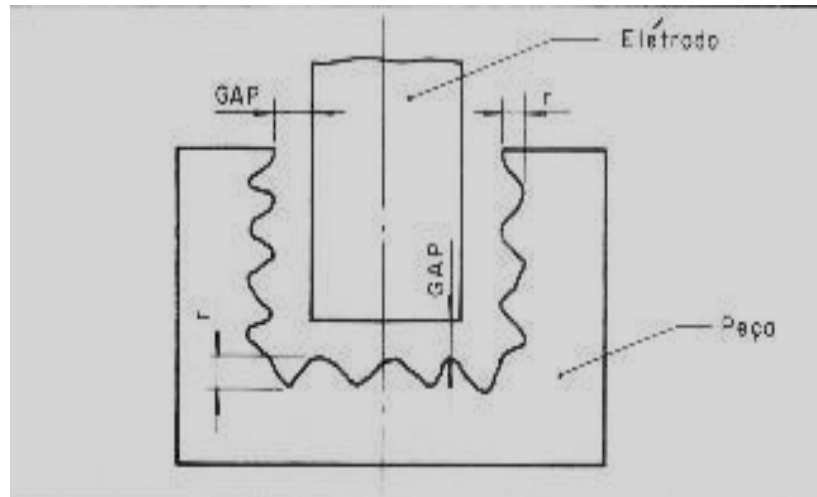


Figura 3.2 – GAP (SENAI, 1981).

$$M_f = M_n - (2 \cdot \text{GAP} + 2r + \text{CS});$$

$M_f$  = Medida final da cavidade;

$M_n$  = Medida nominal do eletrodo;

GAP = Comprimento da centelha;

$r$  = Rugosidade;

CS = coeficiente de segurança (10%).

O GAP frontal é calculado como:  $1\text{GAP}+r$

Vale lembrar que coeficiente de segurança é utilizado apenas em operações de desbaste não havendo tal coeficiente quando se trata de operações de acabamento onde a precisão do processo pode chegar a 0,005mm.

Deve-se salientar que o GAP é consequência de fatores como amperagem, tempo de impulso e do tipo do sistema de limpeza (lavagem), utilizado para a remoção dos resíduos acumulados na região das descargas elétricas.

### 3.1.7 - Remoção de Material / Desgaste do Eletrodo

Durante o processo de usinagem por descargas elétricas é produzida uma remoção de material (velocidade de usinagem) tanto na matéria prima a usinar, cuja unidade de medida é  $\text{mm}^3/\text{min}$ , quanto no eletrodo (desgaste) onde o valor é dado em porcentagem.

O objetivo da usinagem por este processo é conseguir o máximo de remoção de material com o mínimo de desgaste possível, ajustando-se parâmetros já mencionados, ou seja, intensidade da corrente, tempo de impulso, tempo de pausa, polaridade e lavagem.

Com os parâmetros citados devidamente definidos, pode-se calcular o tempo de usinagem para determinada operação, com uma margem de acerto de 78% a 85%.

### 3.1.8 - Sistema de Limpeza (Lavagem)

De acordo com a natureza do processo, o especialista pode utilizar dois tipos de sistema de lavagem:

- Lavagem por pressão ou injeção;
- Lavagem por aspiração ou sucção.

A lavagem por injeção tem como finalidade injetar o dielétrico por via lateral ou frontal geralmente utilizadas em operações com cavidades não-passantes, como mostra a figura 3.3.

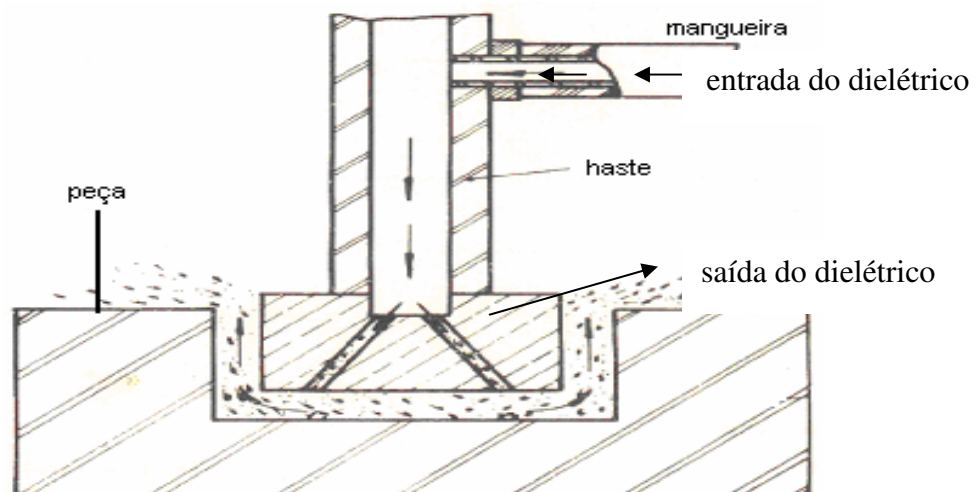


Figura 3.3 – Sistema de Limpeza por Pressão (SENAI, 1981).

Cabe salientar que o valor do GAP utilizando o sistema de pressão como limpeza é maior do que utilizando o sistema de limpeza por sucção.

Neste tipo de sistema as partículas de material erodido podem entrar em contato com o eletrodo e a peça, ocasionando curto-circuito e um aumento nas dimensões da cavidade ou conicidade das paredes laterais, fato que não ocorre na limpeza por sucção, como mostra a figura 3.4.

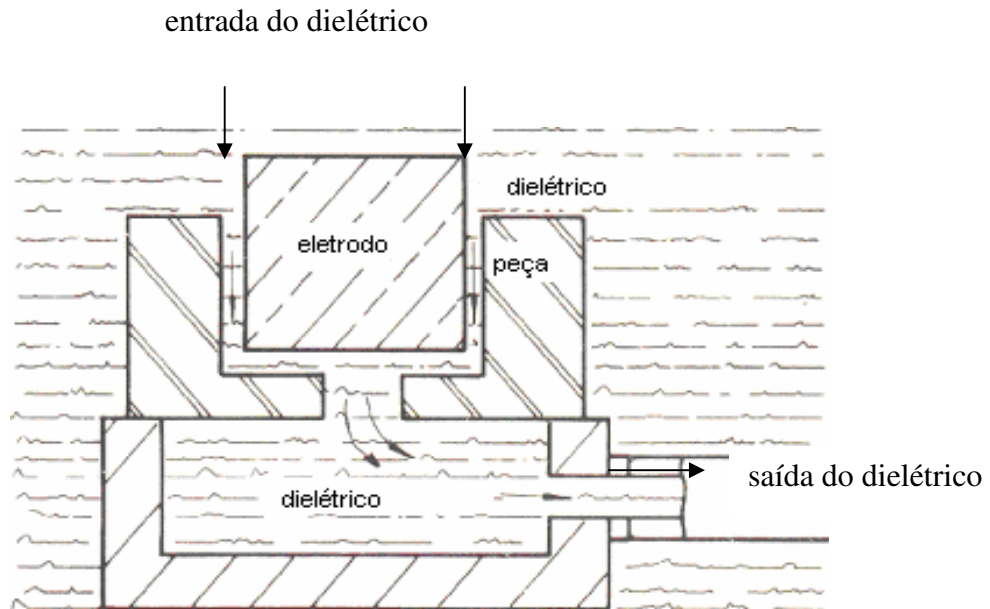


Figura 3.4 - Sistema de Limpeza por Sucção (SENAI, 1981).

Percebe-se então o quanto é importante o registro, conservação e acesso de todos os parâmetros para se chegar a uma perfeita rugosidade com o mínimo de desgaste do eletrodo e máxima velocidade de usinagem e precisão.

Na tabela 3.2 estão contidos os parâmetros mencionados, fornecidos por um fabricante de máquinas de usinagem por eletroerosão os quais são selecionados pelo especialista de acordo com a natureza do processo (MANUAL DE INSTALAÇÃO E OPERAÇÃO ENGEMAQ, 1999).

Tabela 3.2 – Tabela de Parâmetros de Rugosidade

Setting Values			Roughness	Stock Removal - Vw Wear Rate - Vv		Undersize Gap _ 2 gs = 2 gap side				Test Conditions		
Ton	Ts	Toff	Rmax	Vw mm3 / min	Vv %	Pressure (mm)		Aspiration (mm)		Vmin Volt	Iav A	Área Cm <sup>2</sup>
						2gs max	2 gs	2 gs max	2 gs			
5	1	48	7	1,6	10	0,071	0,045	0,058	0,032	45	1	5
5	3	48	8	9,6	40	0,090	0,057	0,077	0,044	43	2	5
10	1	65	8	4	5	0,085	0,053	0,072	0,040	45	2	5
10	3	71	11	21	24	0,121	0,072	0,109	0,056	43	4	5
20	1	76	11	6,8	3	0,114	0,068	0,099	0,053	45	2	5
20	3	83	16	32	11	0,150	0,086	0,135	0,071	40	6	5
50	5	91	26	81	8,0	0,226	0,118	0,212	0,103	32	15	10
50	14	91	37	264	22	0,319	0,153	****	***	30	42	15
75	1	83	16	5	0	0,155	0,09	0,138	0,073	38	2,5	5
75	18	86	48	368	18	0,386	0,180	***	***	30	55	15
100	1	87	19	3.5	0	0,172	0,096	0,156	0,08	36	2,5	5
100	18	89	54	376	15	0,443	0,197	***	***	30	56	15
150	2	88	26	16	0	0,223	0,121	0,208	0,100	38	6,5	5
200	11	92	57	216	4,3	0,460	0,204	***	***	30	37	10

### 3.2 - Considerações Finais

O processo de usinagem por descargas elétricas ou eletroerosão é o último processo a ser aplicado nas ferramentas que necessitam deste método de fabricação, portanto, o processo exige uma atenção especial.

Este processo é aplicado quando a peça passou por vários outros processos de usinagem, possuindo um alto valor agregado.

Se algo acontece de errado nesta fase, todos os processos de usinagem anteriores serão perdidos, gerando um retrabalho de todas as fases operacionais. Além de perder toda matéria prima, o tempo e a mão de obra gerada com o retrabalho geram grandes prejuízos.

O tempo gasto na consulta de manuais na busca de todos parâmetros para preparação do equipamento antes mencionado, somado a possíveis erros que podem acontecer, implicam no preço final da ferramenta.

É importante notar que todos os valores contidos nas tabelas de usinagem foram obtidos em condições laboratoriais de teste, podendo haver variações em função do material do eletrodo, procedimentos operacionais, lavagem utilizada, variação da rede elétrica e outras condições.

Uma das possibilidades encontradas refere-se ao uso de sistemas inteligentes que propiciem a automatização de ações antes feitas exclusivamente pelo homem dentro dos setores produtivos.

Nos dias atuais, em que a globalização requer uma postura mais agressiva das empresas, estes sistemas são de fundamental importância, obrigando-as a explorar todas as possibilidades que possam resultar em aumento de competitividade e produtividade.

Com isto, conclui-se que seja necessária a implantação de um sistema especialista com o objetivo de preservar e fornecer de forma otimizada todos os conhecimentos teóricos e heurísticos e além de tudo armazenar novos conhecimentos que antes apenas os especialistas os possuía.

## Capítulo 4 – Material e Método

Este capítulo é destinado à exposição dos materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho.

### 4.1 - Materiais

O Sistema Especialista foi desenvolvido utilizando-se um computador com a seguinte configuração:

- Padrão IBM PC;
- Processador AMD – K6;
- 152,0 MB RAM;
- Sistema Operacional *Windows 98*;
- HD 10 GB.

Utilizou-se o *Shell Expert SINTA*, versão 1.1.2.0, de domínio público, desenvolvida no LIA (Laboratório de Inteligência Artificial da Universidade Federal do Ceará) e implementada em linguagem orientada a objeto.

### 4.2 - Método

A presente dissertação foi elaborada em duas fases. A primeira consistiu em uma revisão bibliográfica sobre usinagem não tradicional com ênfase na usinagem por descargas elétricas e sistemas inteligentes.

A segunda fase trata das etapas do desenvolvimento do sistema, técnica e metodologia empregada e sua configuração.

#### 4.2.1 - Sistema Especialista Aplicado à Técnica de Usinagem por Eletroerosão

O Sistema foi desenvolvido com o objetivo de auxiliar o usuário (especialista) a determinar de forma otimizada os parâmetros necessários para se obter um certo grau de rugosidade nas superfícies manufaturadas pelo processo de usinagem por descargas elétricas.

O sistema mencionado armazena em sua base de conhecimento conhecimentos heurísticos e teóricos; além do conhecimento existente em sua base, o sistema é capaz de armazenar novos conhecimentos adquiridos pelo especialista no seu dia-a-dia.

Para que o processo seja eficaz, o sistema é dotado de uma interface gráfica capaz de questionar o usuário e reunir informações para a seleção dos seguintes parâmetros:

- Seleção do material a usinar;
- Seleção do material do eletrodo;
- Valor da Rugosidade;
- Determinação da intensidade da corrente;
- Determinação do tempo de impulso e pausa;
- Seleção da polaridade;
- Gap (pressão e aspiração);
- Velocidade de remoção de material;
- Desgaste do eletrodo;
- Tensão mínima;
- Área de contato do eletrodo.

A técnica utilizada para o desenvolvimento do Sistema Especialista é baseada na Aquisição de Conhecimento.

A implementação do conhecimento no ambiente computacional foi realizada utilizando-se a *Shell Expert SINTA*, versão 1.1.2.0.

O *Expert SINTA* é uma ferramenta computacional que utiliza técnicas de Inteligência Computacional para geração automática de sistemas baseados em regras de produção (*production rules*) com a possibilidade de inclusão de conectivos lógicos (E, OU, NÃO, =, <, >, <, >) relacionados aos atributos no escopo do conhecimento e o uso de probabilidades (MANUAL SINTA EXPERT, 1996).

O *Expert SINTA* é um *Shell* implementado na linguagem orientada a objetos *Borland Delphi*, o que proporciona ótimo suporte visual e fácil operação.

O sistema foi desenvolvido e testado em um computador padrão IBM-PC com 152,0 MB de memória RAM, HD de 10GB, sistema operacional *Windows 98* e pode ser utilizado nas plataformas *Windows 3x* ou superior incluindo NT.

O desenvolvimento do sistema foi dividido em cinco etapas:

- Identificação do problema;
- Conceituação;
- Formalização;
- Implementação;
- Testes.

A seguir o método de desenvolvimento será descrito, tendo como referência às fases acima mencionadas.

#### 4.2.2 - Etapas de Desenvolvimento do Sistema

Nas etapas de identificação e conceituação do problema, foram realizadas pesquisas bibliográficas sobre o domínio em questão e entrevistas no chão de fábrica com o especialista, para se definir o que realmente deveria se fazer representar no sistema para satisfazer as condições impostas pelo usuário.

Definiu-se então que o sistema questionaria o usuário sobre qual o tipo de material seria usinado, qual o material do eletrodo e qual o valor da rugosidade. A comunicação entre o sistema e o mundo exterior, ou seja, os questionamentos deveriam ser feitos e respostas deveriam ser obtidas, por meio de uma interface de fácil entendimento ao usuário.

Na etapa de formalização ou modelagem computacional, definiu-se que o conhecimento do especialista seria representado por regras de produção (*production rules*) com estruturas do tipo **SE – ENTÃO** (*if - then*).

Esta sem dúvida, foi a parte mais trabalhosa no desenvolvimento do sistema, pois se buscou representar os conceitos e as relações do domínio mediante as regras de produção.



### 4.2.3 - Arquitetura do Sistema Especialista Aplicado à Técnica de Usinagem por Eletroerosão

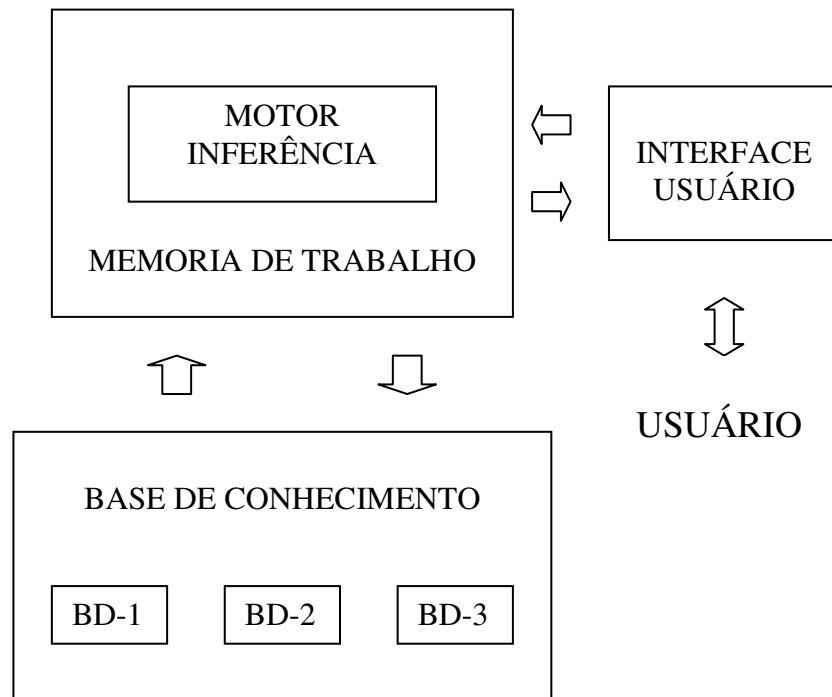


Figura 4.1 – Arquitetura do SE Aplicado à Técnica de Usinagem por Eletroerosão.

Como mencionado no capítulo 2, abordaremos a seguir apenas o módulo correspondente a Base de Conhecimento representada na figura 4.1. Os outros módulos do sistema, já foram abordados na revisão da literatura.

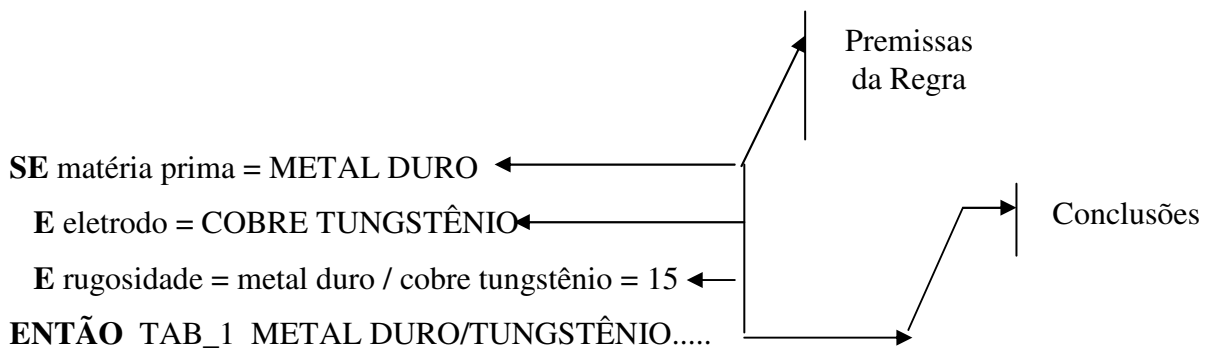
#### 4.2.3.1 - Base de Conhecimento

A base de conhecimento é um dos pontos mais críticos no desenvolvimento do Sistema, pois é o local onde está armazenado o domínio do conhecimento, ou seja, é o local onde se encontra o conhecimento necessário para a resolução de problemas.

Todos os conhecimentos neste caso estão representados por regras de produção, técnica utilizada na representação do conhecimento do domínio em questão. Esta técnica utiliza uma série de estruturas do tipo **SE - ENTÃO**.

As regras de produção são ideais para modelar o conhecimento humano, no qual uma determinada solução deve ser atingida a partir de um conjunto de seleções, graças a sua modularidade, facilidade de edição e transparência do sistema.

A seguir será demonstrado um exemplo de como é representados uma regra de produção e seus componentes dentro da *Shell EXPERT SINTA*:



Os conseqüentes de uma regra são denominados cabeças e os antecedentes de caudas. A estrutura de cada premissa (cauda) é representada pelo seguinte modelo:

< conectivo >	< atributo >	< operador >	< valor >
---------------	--------------	--------------	-----------

- **Conectivo:** Sua função é unir a sentença ao conjunto de premissas utilizadas que formam a seção de antecedentes de uma regra. Ex: E, OU;
- **Atributo:** Variável capaz de assumir uma ou múltiplos valores no decorrer da consulta à base de conhecimento. Ex: O atributo Rugosidade pode receber valores da lista de valores pré-definida [ 7, 8, 9,10...];
- **Operador:** Elo de ligação entre o atributo e o valor da premissa que define o tipo de comparação a ser realizada. Ex: =, >, <> e etc;
- **Valor:** É um item de uma lista previamente criada e relacionada a um atributo. Ex: Eletrodo.

As listas criadas podem ser utilizadas para a construção de menus para que o Sistema faça perguntas como: Qual o material do eletrodo?

Já a estrutura de cada conclusão (cabeça) é representada pelo seguinte modelo:

< atributo >	=	< valor >	< grau de confiança >
--------------	---	-----------	-----------------------

- Atributo: Equivalente ao usado em caudas;
- “=” é um operador de atribuição e não uma igualdade. Se a variável pode acumular múltiplas instâncias, o novo valor substituirá o antigo ou será empilhado ao demais;
- Valor: Equivalente ao mesmo valor usado em caudas;
- Grau de Confiança: Porcentagem que indica a confiabilidade daquela conclusão na regra. Varia de 0 % a 100 %.

Particularmente, esta base de conhecimento é formada por três bases de dados, visando otimizar a busca dos objetivos. São elas: BD-1, BD-2 e BD-3.

Em BD-1, estão armazenados todos os conhecimentos necessários à seleção de parâmetros para o processo com as seguintes características físicas:

- Material a usinar: Metal duro;
- Material do eletrodo: Cobre tungstênio;
- Valor da Rugosidade.

A seguir é mostrada uma das regras de produção introduzidas nesta base de dados:

**REGRA - 1**

**PARÂMETROS 1.1**

**SE** matéria prima = METAL DURO

**E** eletrodo = COBRE TUNGSTÊNIO

**E** rugosidade = metal duro /cobre tungstênio = 15

**ENTÃO**

TAB\_ 1/ METAL DURO / TUNGSTÊNIO = Valores Estabelecidos

ton = 20

ts = 18

toff = 53%

Taxa de remoção de material (V.w) = 38mm<sup>3</sup> / min

Taxa de desgaste do eletrodo (V.v) = 23%

Subdimencionamento = 2gs = 2 gap side

$$2 \text{ gs} = 0,13$$

$$2 \text{ gs máx} = 0,1$$

Polaridade do eletrodo = (-)

Tensão = 100 V

Condições de Teste

Voltmin = 40

Ampers = 20

Área = 20 cm<sup>2</sup>

Em BD-2, estão armazenados todos os conhecimentos necessários à seleção de parâmetros para o processo com as seguintes características físicas:

- Material a usinar: Aço;
- Material do eletrodo: Grafite;
- Valor da Rugosidade.

A seguir é mostrada uma das regras de produção introduzidas nesta base de dados:

REGRA - 1

PARÂMETROS 1.1

**SE** matéria prima = AÇO

**E** eletrodo = GRAFITE

**E** rugosidade = AÇO / GRAFITE = 8

**ENTÃO**

TAB\_ 1/ AÇO / GRAFITE = Valores Estabelecidos

ton = 5

ts = 1

toff = 56%

Taxa de remoção de material (V.w) = 1mm<sup>3</sup> / min

Taxa de desgaste do eletrodo (V.v) = 31%

Subdimencionamento = 2gs = 2 gap side

Pressão (mm) = 2gsmáx = 0,083

$$2\text{gs} = 0,054$$

Aspiração (mm) = 2gsmáx = 0,074

$$2\text{gs} = 0,047$$

Polaridade do eletrodo = (+)

Tensão = 100 V

Condições de Teste

Voltmin = 35

Ampers = 1,5

Área = 5 cm<sup>2</sup>

E, finalizando, em BD-3, estão armazenados os conhecimentos necessários à seleção de parâmetros para o processo com as seguintes características físicas:

- Material a usinar: Aço;
- Material do eletrodo: Cobre eletrolítico;
- Valor da Rugosidade.

A seguir é mostrada uma das regras de produção introduzidas nesta base de dados:

REGRA - 1

PARÂMETROS 1.1

**SE** matéria prima = AÇO

**E** eletrodo = COBRE ELETROLITICO

**E** rugosidade = AÇO / COBRE ELETROLITICO = 7

**ENTÃO**

TAB\_ 1/ AÇO / COBRE ELETROLITICO = Valores Estabelecidos

ton = 1

ts = 5

toff = 48%

Taxa de remoção de material (V.w) = 1,6mm<sup>3</sup> / min

Taxa de desgaste do eletrodo (V.v) = 10%

Subdimensionamento = 2gs = 2 gap side

Pressão (mm) = 2gsmáx = 0,071

2gs = 0,045

Aspiração (mm) = 2gsmáx = 0,058

2gs = 0,032

Polaridade do eletrodo = (+)

Tensão = 100 V

Condições de Teste

Voltmin = 45

Ampere = 1,0

Área = 5 cm<sup>2</sup>

#### 4.2.4 - Desenvolvimento do Ambiente do Sistema Especialista Aplicado à Técnica de Usinagem por Eletroerosão

O Sistema foi desenvolvido a partir da edição da Base de Conhecimento, ou seja, a partir da implementação do conhecimento do especialista através das regras de produção.

A seguir será mostrado todo o procedimento necessário para a criação do sistema em sua totalidade.

##### 4.2.4.1 - Definição das Variáveis

A definição das variáveis ou atributos e suas respectivas listas têm a finalidade de criar uma base de conhecimento organizada. Dessa forma, as regras de produção podem ser criadas visualmente.

Através da janela de edição de variáveis se pode adicionar ou eliminar todas as variáveis e valores. Para se ter acesso à janela de edição das variáveis o especialista escolhe a opção: Variáveis no menu apresentado na figura 4.2.

Cada variável pode ainda assumir uma ou múltiplos valores; as variáveis numéricas podem receber um intervalo restrito para a entrada de valores pelo usuário. No sistema proposto, não houve a necessidade de criar nenhuma variável numérica.

Como já foi mencionado anteriormente, por questões de otimização, no sistema foram criados três bases de dados distintas cada uma com seus respectivos parâmetros, caracterizados pelas condições do processo.

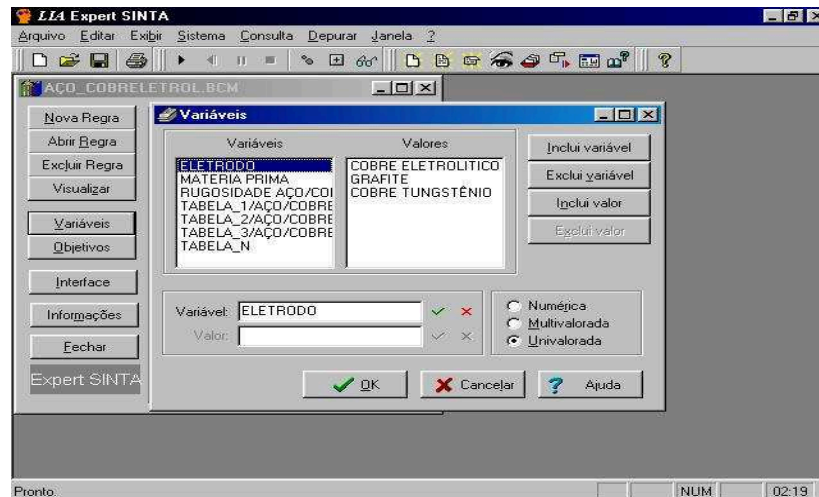


Figura 4.2 – Tela de Menu para criação de variáveis

#### 4.2.4.2 – Definindo os Objetivos

Para realizar uma consulta no sistema especialista, é necessário definir quais serão os objetivos do sistema. Nesta *Shell* em particular eles são tratados de variáveis objetivos.

As variáveis objetivas têm a função de controlar o modo como o motor de inferência irá se comportar quando o sistema especialista for acionado para uma consulta.

Depois de criada as variáveis como mencionado anteriormente, a figura 4.3 nos mostra o menu de opções e nele a opção *Objetivos* que permite determinar quais das variáveis serão os objetivos do sistema.

Depois de definido quais variáveis são as variáveis objetivos, o sistema faz sua comunicação com o usuário através de menus de simples caso a variável tenha um único valor ou múltipla escolha, caso a variável seja multivalorada.

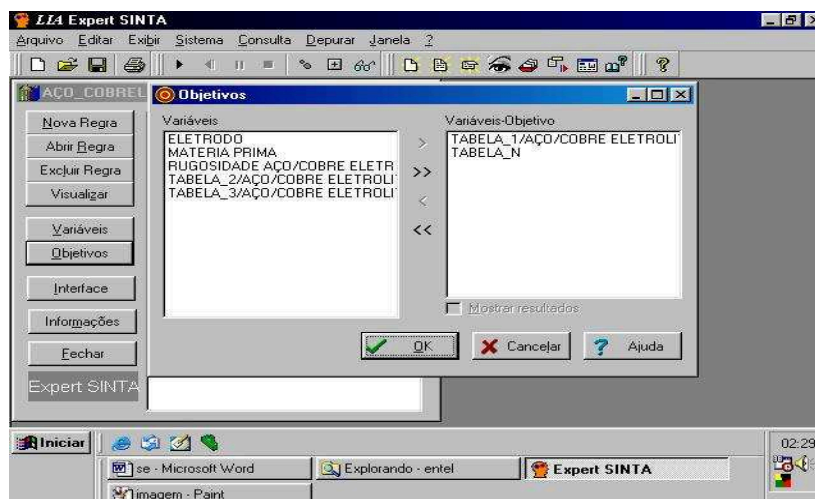


Figura 4.3 – Tela de Menu para definição de objetivos

Os menus são construídos de forma automática pela *Shell do Expert SINTA* agilizando ainda mais o desenvolvimento do sistema.

É atribuída a janela de Interface a responsabilidade de criar, caso necessário, perguntas que o Sistema Especialista tenha a necessidade fazer ao usuário. Para ter acesso a esta janela, o especialista faz uso da opção Interface no menu de opções apresentado na figura.

Para que isto seja possível, é atribuído um determinado valor à variável declarada, assim como atribuir graus de confiança à resposta dada, como mostra a figura 4.4.

Além de poder definir quais perguntas serão feitas ao usuário, também é possível incluir textos explicando quais os motivos / ajuda pelos quais aquela pergunta é necessária, tornando ainda mais claro e interativo o sistema.



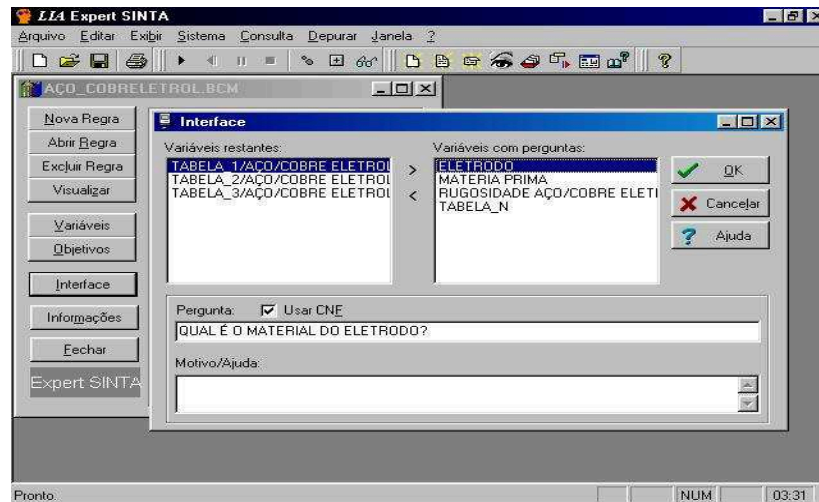


Figura 4.4 – Tela para formular as perguntas executadas no SE

#### 4.2.4.3 - Edição das Regras de Produção

O passo seguinte após a definição das variáveis e seus valores será a edição das regras de produção.

As regras de produção podem ser editada a partir da opção Nova Regra, visualizado na figura anterior. A partir da seleção dos itens **SE** e **ENTÃO**, todas as sentenças podem ser criadas de maneira simples, sem a necessidade de conhecimentos de programação.

Várias ferramentas de edição como alterar, incluir, excluir, nova, cancelar e ajuda, estão disponíveis para auxiliar na edição das regras de produção como mostra a figura 4.5.



Figura 4.5 – Edição das regras de produção

#### 4.2.4.4 - Implementando Informações Adicionais

Uma das metas imposta a todo Sistema Especialista é a de conseguir substituir de forma aceitável o especialista.

Além de todas as informações incorporadas a sua base de conhecimento, vários tipos de informações complementares, como nome da base, autor, textos de abertura e principalmente textos didáticos referentes aos objetivos alcançados, podem ser implementados.

Estas informações tendem a melhorar a interatividade com o usuário e a melhor compreensão das metas do sistema.

A *Shell* utilizada para o desenvolvimento deste sistema, informações adicionais sobre o problema em questão podem ser inclusas e gerar uma tela de abertura fazendo alguns esclarecimentos sobre o sistema aos usuários logo no primeiro contato com o sistema especialista. A configuração desta tela é feita através da opção Informações do menu apresentado na figura 4.6.

Após conclusão desta etapa o sistema poderá ser executado e sua base de conhecimento consultada.

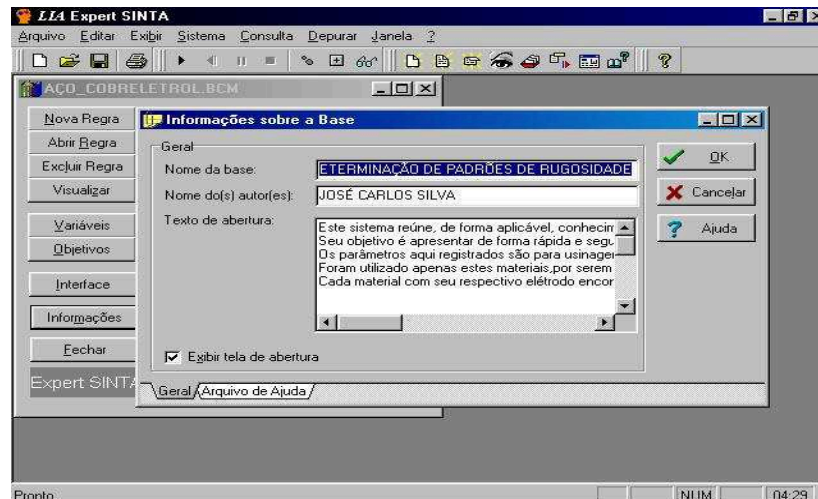


Figura 4.6 – Configuração da Tela de Apresentação do Sistema

#### 4.2.4.5 - Criação de Senhas

Todos os sistemas especialistas na verdade não deixam de ser programas de computador, portando tem a característica de agregar algum tipo de proteção como acontece nos software de aplicação comum.

Logicamente neste caso não é comum criar-se um sistema especialista com uma senha onde o usuário não possa modificar o conteúdo da base de conhecimento.

Na verdade um sistema especialista que não permite que seja exibido o conteúdo de suas regras, não permite modificá-las e não permite o acompanhamento de sua execução e a verificação dos resultados obtidos não tem a mesma confiabilidade de um sistema que permite o acesso completo a suas bases.

A *Shell* na qual o sistema foi desenvolvido, permite três níveis de segurança:

- Permite a execução e visualização: Com esta opção o usuário do sistema especialista não tem permissão de modificar sua base, mas poderá executa-la e imprimir. Esta opção evita que estranhos modifiquem a base de conhecimento.
- Permite somente a execução: Com esta opção o usuário sem a senha apenas executa o sistema especialista, mas não pode visualizar suas regras ou modificar sua base.
- Nenhuma permissão: Apenas pessoas com senha podem utilizar o sistema.

Para configurar tais permissões, escolha na barra de menu Exibir Opções e a janela será exibida como mostra a figura 4.7.

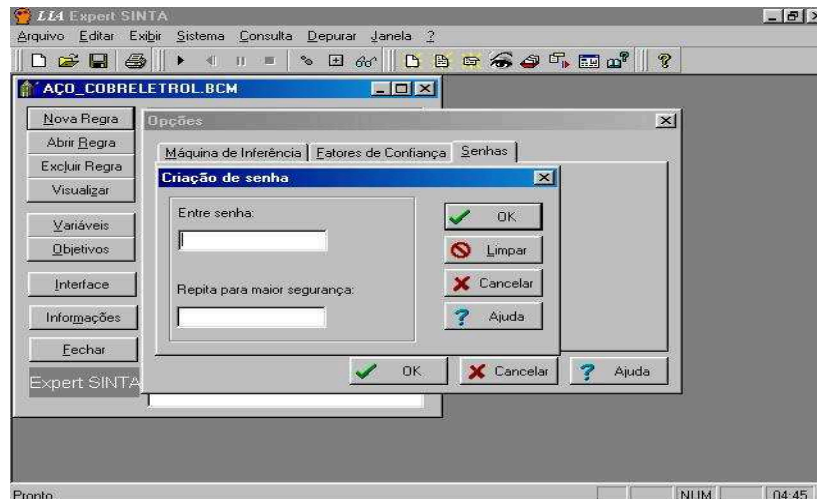


Figura 4.7 – Tela para configuração de senhas

### 4.3 – Considerações Finais

Geralmente a construção de sistemas especialistas agrega os conhecimentos técnicos de diversas áreas, implicando em riscos de produção e custos.

Uma forma de diminuir tal problema é procurar ferramentas que sejam capazes de prototipar, avaliar e implementar o projeto de um sistema especialista, procurando minimizar entre outras coisas o tempo de desenvolvimento.

Uma das principais razões na utilização da Shell Expert SINTA é a facilidade que o usuário encontra para introduzir novos conhecimentos ou até modificar os já existentes em sua base de conhecimento.

A possibilidade de inclusão de textos explicativos referentes a cada passo da execução do sistema facilita o entendimento do programa.

Outro razão está na facilidade na criação da interface de comunicação, aspecto de muita importância para um bom despenho do sistema, tudo isto sem a necessidade do usuário possuir grandes conhecimentos na área de informática.

## Capítulo 5 - Resultados

Neste capítulo serão apresentadas as etapas para a realização de uma consulta no Sistema Especialista e os resultados dos testes.

### 5.1 - Inicialização do Sistema Especialista

Após a inicialização do sistema, que deverá ser executado a partir do arquivo **exsinta.Exe**, o usuário terá uma barra de ferramentas e um submenu com as opções para consultar três bases de dados onde estão alocados os conhecimentos necessários para a determinação da rugosidade desejada, como mostra a figura 5.1.

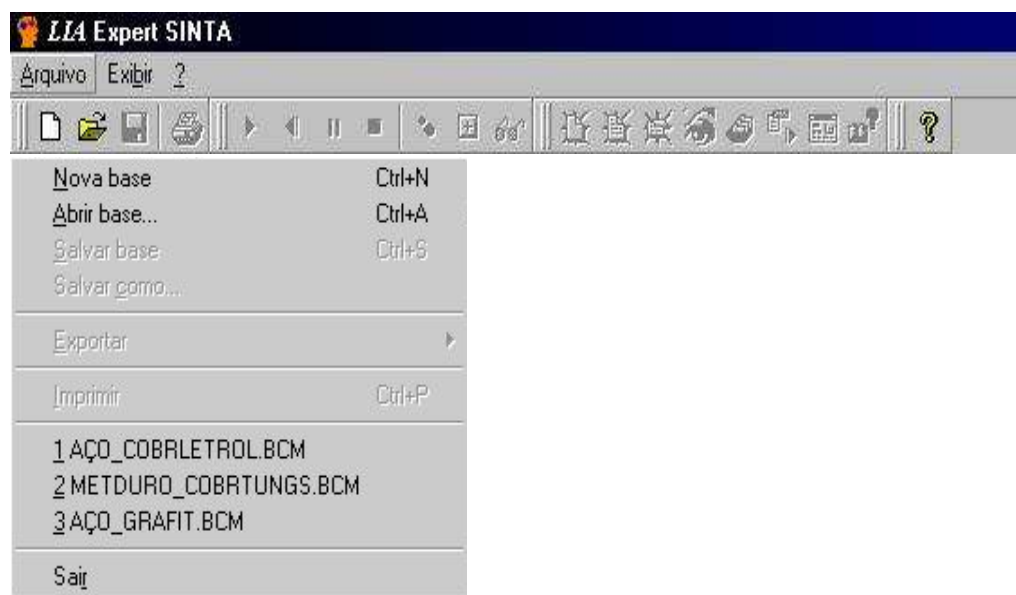


Figura 5.1 – Sub-menu\_ Opções \_Bases de Conhecimento

- **AÇO\_COBRLETROL.BCM:** Corresponde à base de conhecimento que contém todas as informações para a seleção dos parâmetros onde a matéria prima determinada no processo é o aço e o eletrodo é de cobre eletrolítico.
- **METADURO\_COBR TUNGS.BCM:** Corresponde à base de conhecimento que contém as informações para a seleção dos parâmetros onde a matéria prima no processo é o metal duro (Pastilha de Carboneto) e o eletrodo é cobre tungstênio.

- AÇO\_GRAFIT.BCM: Corresponde à base de conhecimento que contém todas as informações para a seleção dos parâmetros onde a matéria prima no processo é aço e o eletrodo é de grafite.

Depois de determinada a escolha da base referente ao processo, inicia-se a consulta propriamente dita pela opção Consulta na barra de ferramentas e opção Iniciar do submenu, surgindo então a tela de apresentação da base referenciada como mostra a figura 5.2.

### 5.1.1 – Iniciando uma Consulta

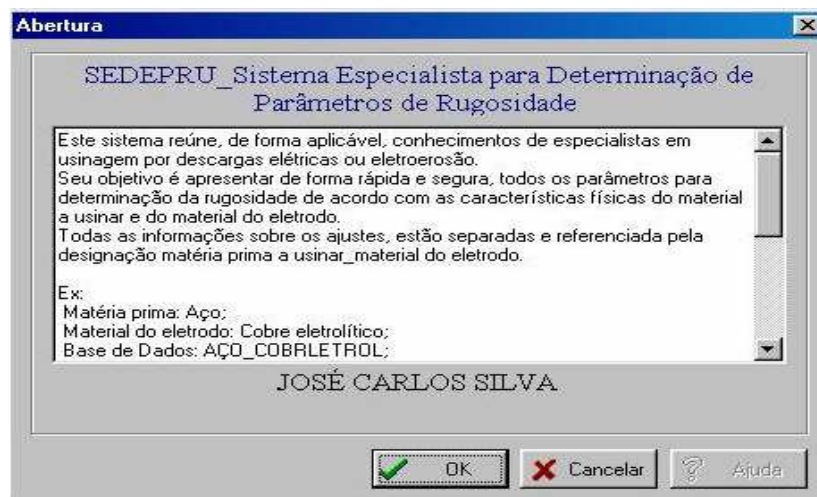


Figura 5.2 – Tela de Abertura

A Tela de Abertura contém o nome do sistema, do engenheiro de conhecimento e um texto dando ao usuário ou especialista uma visão geral do objetivo do sistema conforme o texto a seguir:

“Este sistema reúne conhecimentos de especialistas em usinagem por descargas elétricas ou eletroerosão”.

Seu objetivo é apresentar de forma rápida e segura todos os parâmetros para determinação da rugosidade de acordo com as características físicas do material a usinar, do material do eletrodo e da intensidade da corrente aplicada.

Todas as informações sobre os ajustes estão separadas e referenciada pela designação matéria prima a usinar\_material do eletrodo.

Ex:

Matéria prima: Aço;

Material do eletrodo: Cobre eletrolítico;

Base de Dados: AÇO\_COBRLETROL.

Matéria prima: Metal duro;

Material do eletrodo: Cobre tungstênio;

Base de Dados: METADURO\_COBRTUNG.

Matéria prima: Aço;

Material do eletrodo: Grafite;

Base de Dados: AÇO\_GRAFIT.

No momento você está acessando a base de conhecimento que contém os parâmetros relacionados com AÇO\_COBRE\_ELETROLÍTICO.

Para acessar outra base, siga as seguintes instruções abaixo:

Escolha na opção Arquivo na barra de ferramentas e escolha a base desejada”.

Cabe ressaltar que esta tela de abertura será a mesma independentemente da base de dados escolhida.

### 5.1.2 - Diálogo entre Usuário e o Sistema Especialista

O primeiro questionamento que o sistema faz ao usuário diz respeito a que tipo de matéria prima ele ira processar, grau de confiança, o por que, e alerta para que o usuário escolha apenas uma das opções mencionadas.

Escolhida a opção, como mostra a figura 5.3, o próximo questionamento será qual a matéria prima do eletrodo.

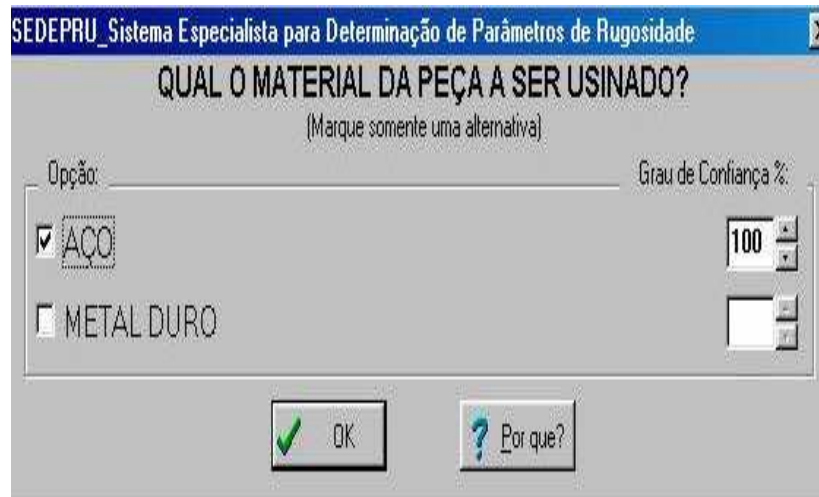


Figura. 5.3 – Diálogo entre usuário e o sistema.

A tela que aparece na figura 5.4 questiona o usuário sobre qual o material do eletrodo, dando ao usuário um menu com três opções, grau de confiança, o por que e alertando para que seja escolhida apenas uma opção.

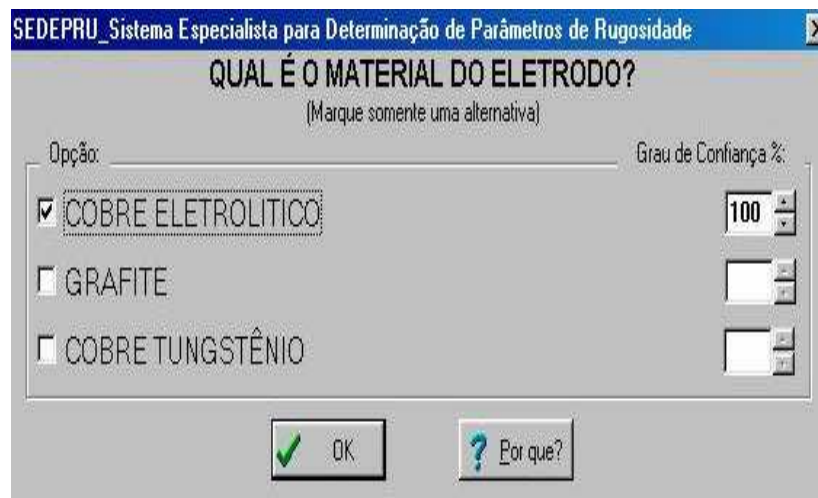


Figura 5.4 – Diálogo entre usuário e sistema.

Satisfeita mais uma condição, o sistema pergunta ao usuário qual o padrão de acabamento (rugosidade) desejado para aquela superfície, qual seu grau de confiança, o por que e alerta para que seja escolhida apenas uma alternativa, como mostra a figura 5.5.



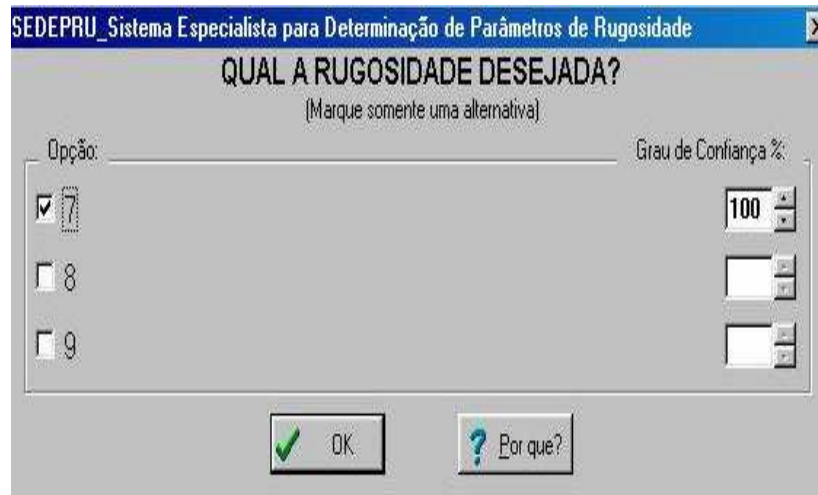


Figura 5.5 – Diálogo entre usuário e sistema.

Finalizando na figura 5.6, o sistema mostra a tela de resultados que contém uma tabela com todos os parâmetros necessários para que o especialista consiga o padrão de rugosidade adequado para cada aplicação.

Valor	CNF (%)
Valores Estabelecidos	100
TDN= 5	100
TS= 1	100
DT= 48%	100
Taxa de Remoção de Material - Vw	100
1.6mm3/min	100
Taxa de Desgaste do Eletrodo - Vv	100
10%	100
Subdimensionamento - 2gs = 2 gaps side	100
2gs max = 0.071	100
2gs = 0.045	100
2gs max = 0.058	100
Aplicação = (....)	100

Figura 5.6 – Tela de Resultados

O Sistema Baseado em Conhecimento assim como todo sistema especialista tem por missão atingir conclusões para determinados objetivos em domínios específicos.

Depois de atingido tais objetivos, a *Shell do Expert SINTA* apresenta uma janela com os resultados e de como chegou àquelas conclusões.

Como mencionado anteriormente o sistema especialista proposto tinha como objetivo determinar parâmetros para a determinação de rugosidade em superfícies que utilizam o processo de usinagem por descargas elétricas.

Acima na tela de resultados pode-se visualizar:

- Ton: Corresponde ao tempo de descarga da corrente;
- Ts: Números de transistores acionados para conseguir uma dada amperagem;
- Dt / Toff: Corresponde ao tempo de pausa entre uma descarga e outra;
- Vw: Corresponde à taxa de remoção de material;
- Vv: Corresponde à taxa de desgaste do eletrodo;
- Gap: Corresponde ao comprimento da faísca.

O restante dos parâmetros não visualizado por questões de captura de imagem é: polaridade, tensão de trabalho, e condições de teste.

Pode-se também na tela de resultados encontrar as seguintes informações:

- Histórico: Exibe o raciocínio usado pelo sistema para chegar até aquela conclusão através de uma árvore de pesquisa;
- Todos os resultados: Exibe todos os valores das variáveis;
- O sistema: Exibe todas as regras do sistema especialista.

Cabe salientar que no sistema quando o objetivo não é atingido por questões de incompatibilidade com a base de conhecimento selecionada, ou seja, o usuário deseja consultar informações que não pertence àquela base, ele será avisado com as seguintes telas representadas pelas figuras 5.7 e 5.8.

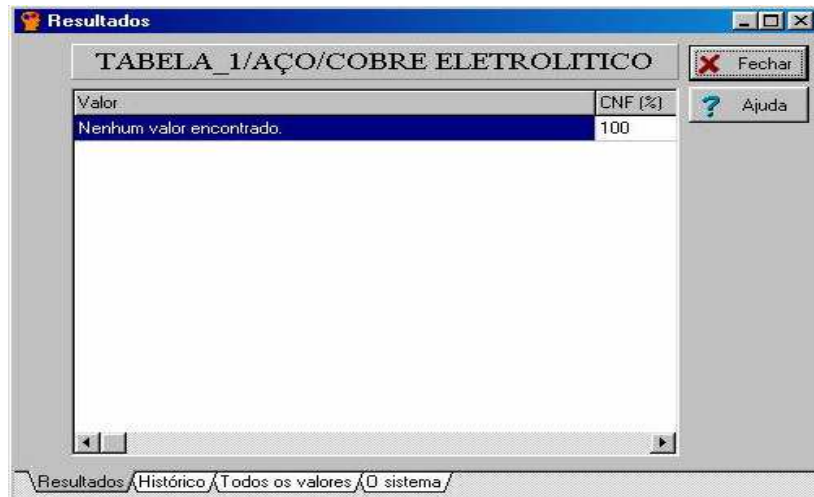


Figura 5.7 – Resposta não encontrada



Figura 5.8 – Base de conhecimento incompatível



Figura 5.9 – Fim da consulta

Aqui o usuário termina sua consulta como mostra a figura 5.9. Cabe agora ao usuário procurar a base de dados ideal na barra de menu, na opção Arquivo e iniciar uma nova consulta.

Para comprovar a eficiência e aplicabilidade do sistema, foram realizados alguns testes comparativos de tempos na preparação do equipamento utilizando o sistema convencional (SC) e o sistema especialista (SE).

Os testes foram realizados em uma empresa especializada em usinagem por descargas elétricas e a máquina utilizada foi uma eletroerosão por penetração de marca Engemaq de 40 ampères.

Todos os testes apresentados são casos reais. Na ocasião foram usinadas peças de aço com eletrodo de cobre eletrolítico por serem os materiais mais utilizados no chão de fábrica.

Os testes foram realizados em duas etapas: Na primeira etapa, foi comparado o tempo total que o operador gasta para preparar o equipamento de maneira convencional, ou seja, consultando as tabelas existentes nos manuais e anotações particulares, como mostra a figura 5.10.



Figura 5.10 – Busca manual dos parâmetros de rugosidade

Logo em seguida, os mesmos testes foram aplicados utilizando o sistema especialista como mostra a figura 5.11.



Figura 5.11 – Busca dos parâmetros utilizando o SE

Foi realizado um total de três aferições e os resultados podem ser visualizados na figura 5.12.

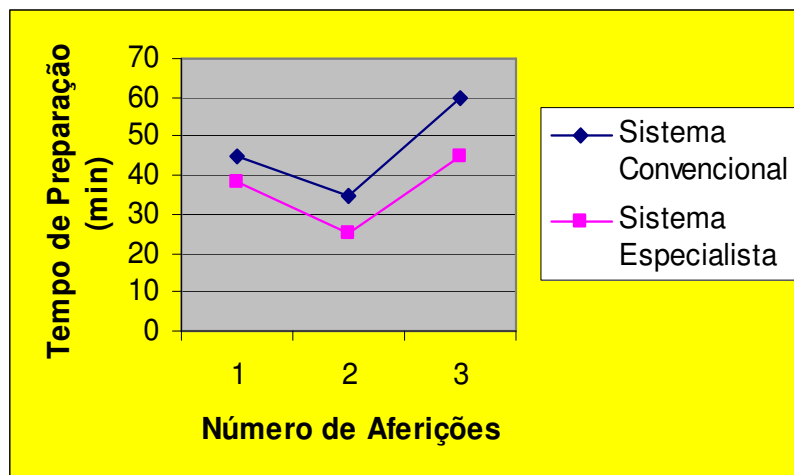


Figura 5.12 – Sistema Convencional *versus* Sistema Especialista

Ao analisar os resultados expressos no gráfico, pode-se perceber uma redução do tempo de preparação do equipamento de 20% a 30% em média utilizando o sistema especialista. É uma redução significativa no tempo não-produtivo (envolvendo tarefas humanas), comprovando a eficiência do sistema especialista.

## Capítulo 6 - Conclusão

Este capítulo é dedicado à conclusão do trabalho proposto.

Em relação ao operador, notaram-se dois comportamentos distintos. A princípio houve certa resistência ao sistema especialista, atitude normal quando se automatiza ações que dependem da execução humana, talvez pelo fato de que certas informações que antes apenas ele (o operador) possuía, a partir daquele instante estavam registradas de forma organizada, podendo qualquer usuário ter acesso ao seu conteúdo. Por outro lado, percebeu-se um certo estímulo na obtenção e introdução dos parâmetros utilizando o sistema especialista possibilitando-o um novo aprendizado.

A aplicação desenvolvida nesse trabalho permite responder a cada consulta feita pelo especialista de acordo com os conhecimentos contidos na base de conhecimento, além de apresentar comentários justificando e orientando cada resposta e questionamento que são feitos ao usuário.

A utilização da *Shell* orientada a objeto e utilizando-se regras de produção, as quais são muito semelhantes à linguagem humana para expressar o conhecimento do especialista, permitiu de forma simples a introdução ou retirada de um novo parâmetro adquirido.

Os resultados obtidos nos testes respaldam o trabalho desenvolvido e qualificam o sistema especialista a ser utilizado no ambiente fabril como importante ferramenta de otimização, reduzindo de forma significativa os tempos improdutivos, com conseqüente aumento da produtividade e da qualidade do processo.

A organização e a estruturação do conhecimento fornecida pelo sistema especialista torna a informação mais consistente e segura, diminuindo a possibilidade de erros na busca informal dos parâmetros.

O uso de ferramentas computacionais no apoio à tomada de decisões torna-se cada vez mais necessárias em processos que dependem da qualificação de recursos humanos, principalmente no tocante ao aprendizado de novos conhecimentos, reforço do acervo disponível e ordenação dos casos apresentados ao usuário considerando os critérios definidos.

## Bibliografia

- Azevedo, S. L.: *Desenvolvimento de um Protótipo de Sistema Especialista para a escolha do tipo de Fundações*, dissertação de doutorado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p.300, março, 1999.
- Baptista, E. A, & Coppini, N. L.: *Sistema Especialista para otimizar processos de usinagem e aumentar os lucros*, artigo publicado na revista Máquinas e Metais, Aranda Editora, nº 451, agosto, 2003.
- Brown, J. A.: *Modern Manufacturing Processes*, first edition, Inc\_New York, p. 67-75, 1999.
- Chiaverini, V.: *Tecnologia Mecânica*, 2º edição, Editora Pearson Education do Brasil, São Paulo, p. 227-233, 1986.
- Departamento de Engenharia Engemaq.: *Manual de Operação e Instalação*, editora Key West, 1999.
- Ferraresi, D.: *Usinagem de Metais*, 8º edição, Editora ABM, São Paulo, p16-61, 1975.
- Krishnamoorthy, C. S & Rajeev, S.: *Artificial Intelligence and Expert Systems for Engineers*, editora CRC Press, Inc USA, New York, p.29-35, 1996.
- Levine, R. I, Drang, D. E & Edelson, B.: *Inteligência Artificial e Sistemas Inteligentes\_ Aplicações e exemplos práticos*, 1º edição, editora McGraw-Hill, São Paulo, p. 33-60, 1988.
- LIA, Laboratório de Inteligência Artificial.: *Manual do usuário EXPERT SINTA*, Universidade Federal do Ceará, 1996.

- Resende, S. O.: *Sistemas Inteligentes\_ Fundamentos e Aplicações*, 1º edição, editora Manole, São Paulo, 2003.
- Senai: *Manual do Operador de Máquinas de Eletroerosão*, 1º edição, Coleção básica cinterfor, p.60, 1981.
- Turban, E. & Aronson, J. E.: *Decision Support Systems*, 6º edição, editora Printice-Hall, Inc Upper Saddle River, New Jersey, p. 396-583, 2001.



## Anexos

### ANEXO A – Nariz Artificial

#### Descrição do Problema

Uma grande variedade de gases e vapores necessita ser analisado em diversas aplicações como monitoramento ambiental, diagnóstico médico e controle de qualidade na indústria de alimentos.

Atualmente os odores ainda são analisados por narizes humanos que além da variação da sensibilidade de olfato de indivíduo para indivíduo, estão sujeito a alergias e outras infecções, daí a necessidade de construir narizes artificiais.

Técnicas Utilizadas: Para o reconhecimento de odores foram utilizadas as seguintes técnicas: Redes Neurais, algoritmos Genéticos e “*Simulated Annealing*”.

### ANEXO B – Diagnósticos de Falhas de Transformadores

#### Descrição do Problema

O diagnóstico de falhas de distribuição de energia elétrica baseada em medidas feitas em laboratórios requer um conhecimento razoável para a correta interpretação das medições.

Para ampliar o número de usuários capacitados para analisar os resultados dos testes em transformadores, necessitava-se de criar um sistema especialista para auxiliar nesta tarefa.

Técnicas Utilizadas: Aquisição de conhecimento, Sistemas Baseados em Conhecimento, Reconhecimento de Padrões.

## ANEXO C – Aplicação de Redes Neurais Artificiais em Laminação

### Descrição do Problema

O processo de laminação caracteriza-se por envolver grande quantidade de parâmetros não-lineares, dentre os quais vários não possuem uma forma de medição direta, como tensão de escoamento e atrito.

Diversos ensaios de atrito e escoamento são feitos para se estimar condições exatas de laminação, pois tanto a temperatura como a velocidade de deformação durante o processo pode não ser a mesma obtida no ensaio.

Com o emprego de redes neurais torna-se possível trabalhar com o processo de laminação, desconhecendo variáveis mecânicas ou metalúrgicas.

Técnicas Utilizadas: Curvas de funções logarítmicas, determinação de seqüências de passes de laminação e Redes Neurais Multicamadas.

## ANEXO D – Fusão de Sensores

### Descrição do Problema

A área de fusão de sensores é muito extensa e tem sido usada na solução de vários tipos de problemas e diferentes áreas de aplicação.

No exemplo comentado, o objetivo do trabalho é melhorar a precisão e estabilidade de medidas de distância entre um robô e um objeto no seu ambiente de trabalho obtida de diferentes sensores.

Técnicas Utilizadas: Algoritmos de Aprendizado de Máquina, Redes Neurais.

## ANEXO E – Sistema Especialista para Otimizar Processos de Usinagem e Aumentar os Lucros

### Descrição do Problema

No trabalho citado, apresenta-se um sistema especialista para otimizar processos de usinagem que emprega como base o intervalo de máxima eficiência. A determinação da condição de corte foi proposta no chão de fábrica e consiste de testes para obter o coeficiente da vida da ferramenta de corte. O sistema pode ser utilizado nos modos interativo e totalmente automático (BAPTISTA & COPPINI, 2003).

Técnicas Utilizadas: Aquisição de Conhecimento e Sistema Baseado em Conhecimento.

## ANEXO F – Desenvolvimento de Protótipo de Sistema Especialista para Escolha do Tipo de Fundações

### Descrição do Problema

A engenharia de fundações é uma área do conhecimento que envolve muita intuição e experiência para encaminhar soluções de grande parte dos problemas que enfrenta. Na tarefa de escolher os tipos de fundações tecnicamente adequadas às condições impostas, freqüentemente o engenheiro de fundações trabalha com dados incompletos e / ou imprecisos, quando, muitas vezes, uma análise qualitativa é mais importante do que uma análise quantitativa das informações (AZEVEDO, 1999).

Neste trabalho comentado, o objetivo é desenvolver um sistema especialista para auxiliar na escolha dos tipos de fundações tecnicamente adequados às condições impostas pelo usuário.

Técnicas Utilizadas: Aquisição de Conhecimento e Sistema Baseados em Conhecimento.

