

EDUARDO PINTO

**SISTEMA INTELIGENTE PARA ESPECIFICAÇÃO
DO APERTO IDEAL EM OPERAÇÕES DE
PARAFUSAMENTO.**

**Dissertação apresentada para obtenção do Título
de Mestre em Engenharia Mecânica da
Universidade de Taubaté,**

**Área de Concentração: Automação Industrial e
Robótica.**

Orientador: Luiz Octávio Mattos dos Reis

Taubaté – SP

2005

EDUARDO PINTO

SISTEMA INTELIGENTE PARA ESPECIFICAÇÃO DO APERTO IDEAL
EM OPERAÇÕES DE PARAFUSAMENTO.

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ, TAUBATÉ, SP

Data: 05 de Março de 2005

Resultado: Aprovado

COMISSÃO JULGADORA

Prof. Dr. Leonardo Mesquita, UNESP – Guaratinguetá

Assinatura_____

Prof. Dr. Luiz Octávio Mattos dos Reis, UNITAU – Taubaté

Assinatura_____

Prof. Dr. Ronaldo Rossi, UNITAU – Taubaté

Assinatura_____

Dedico este trabalho a (ao)

Minha família pelo apoio e incentivo para alcançar este objetivo.

Minha esposa Andréa Roder Pinto

Meu pai Claudio Pinto

Minha mãe Maria Aparecida Pracidelli Pinto

Meu sogro Luiz Carlos Roder

Minha sogra Maria Silvia Vidor Roder

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Luiz Octávio Mattos dos Reis, pela habilidade com que orientou este trabalho.

A empresa M. Shimizu, por ceder o laboratório para testes e realização de experimentos.

A empresa Atlas Copco, por fornecer a literatura sobre o assunto abordado.

Ao meu cunhado Luis Antonio Roder, por realizar a revisão ortográfica da dissertação.

Aos meus colegas de trabalho que contribuíram nas pesquisas e testes laboratoriais.

Ao meu amigo José Carlos da Silva pelo companheirismo durante o curso.

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| Resumo | 1 |
| Abstract | 2 |
| Introdução | 3 |
| Capítulo 1 – Revisão da Literatura | |
| 1.1 - Conceitos e Definições de Inteligência Artificial..... | 5 |
| 1.2 - Comparação entre Inteligência Artificial e Inteligência Natural | 6 |
| 1.3 - Campo da Inteligência Artificial | 8 |
| 1.4 - Sistema Especialista (SE) | 9 |
| 1.4.1 – O Elemento Humano..... | 10 |
| 1.5 - Sistema Baseado em Conhecimento (SBC) | 12 |
| 1.5.1 – Conceitos e Definições | 12 |
| 1.5.2 - Arquitetura do SBC | 14 |
| 1.5.2.1 – Base do Conhecimento | 15 |
| 1.5.2.2 – Motor de Inferência | 16 |
| 1.5.2.3 – Interface com o Usuário | 18 |
| 1.5.2.4 – Representação do Conhecimento | 19 |
| 1.5.3 – Aplicações do SBC | 21 |
| 1.6 - Ferramentas utilizadas para criação de Sistemas Baseados em Conhecimento | 24 |
| 1.7 - Conceitos e Definições sobre Tecnologia do Aperto..... | 27 |
| 1.7.1 – Força de União ou Força Inicial de Montagem | 27 |
| 1.7.2 – Tipos de Rosca, Parafusos e Porcas | 31 |
| 1.7.2.1 – Tipos de roscas..... | 31 |
| 1.7.2.2 – Parafusos..... | 32 |
| 1.7.2.3 – Porcas..... | 35 |
| 1.7.3 - Tipos de Juntas | 36 |
| 1.7.3.1 – Introdução..... | 36 |
| 1.7.3.2 – Juntas Rígidas..... | 36 |
| 1.7.3.3 – Juntas Flexíveis..... | 37 |
| 1.7.4 - Parâmetros Básicos de Controle de Aperto..... | 38 |
| 1.7.4.1 – Torque..... | 38 |
| 1.7.4.2 – Torque e Ângulo..... | 40 |

| | |
|---|--------|
| 1.7.5 - Tipos de Equipamentos Utilizados em Fixações..... | 43 |
| 1.7.5.1 – Chave Manual..... | 43 |
| 1.7.5.2 – Chaves de Impacto e Impulso..... | 43 |
| 1.7.5.3 – Apertadeiras..... | 44 |
| 1.7.5.4 – Parafusadeira elétrica..... | 45 |
| 1.7.6 – Calibração de Torque no Processo de Manufatura..... | 46 |
| 1.8 - Conceitos de Estatística..... | 47 |
| 1.8.1 - Definição de Histograma | 47 |
| 1.8.2 - Definição de Capacidade do Processo..... | 52 |
| 1.8.2.1 – Análise de Capacidade..... | 53 |
| 1.8.2.2 – Índice de Capacidade..... | 54 |
| Capítulo 2 – Proposição | 57 |
| Capítulo 3 – Material e Método | |
| 3.1 – Lista de Material..... | 59 |
| 3.2 – Método..... | 60 |
| 3.2.1 – Avaliação do comportamento do equipamento..... | 60 |
| 3.2.2 – Pesquisas nos processos de manufatura..... | 61 |
| 3.2.3 – Programação do Sistema Especialista – SEVAT..... | 62 |
| Capítulo 4 – Resultados e Discussão | |
| 4.1 – Análise estatística do comportamento do equipamento para uma junta pré-estabelecida..... | 69 |
| 4.2 - Tempo para cálculo e definição dos parâmetros de torque pelo engenheiro <i>versus</i> consulta automática no banco de dados “SEVAT” | 75 |
| 4.3 - Validação do Sistema Especialista “SEVAT” | 77 |
| Capítulo 5 – Conclusão..... | 83 |
| Referências Bibliográficas..... | 85 |

LISTA/DEFINIÇÕES/SÍMBOLOS

" 6σ " – Seis Sigma

"CEP" – Controle Estatístico do Processo

"CP" – Capacidade do Processo

"CPK" – Capabilidade do Processo

"IA" – Inteligência Artificial

"LIE" – Limite Inferior de Engenharia

"LSE" – Limite Superior de Engenharia

"SE" – Sistema Especialista

"SBC" – Sistema Baseado em Conhecimento

"Staff" – Departamento de uma empresa que desenvolve produtos e suporta os usuários.

"Delphi" – Linguagem de programação computacional

"Shell" – Ferramenta computacional utilizada para criar banco de dados.

"ISO" – Internacional Standard Organization

"ABNT" – Associação Brasileira de Norma Técnica

"DIN" – Deutsche Industrie Normalization

"Bits" – Ferramenta usada para apertar parafusos.

"Socket" – Ferramenta com sextavada interno usada para apertar parafusos.

"ISO TS16949" – Norma que rege o sistema de qualidade da indústria automobilística.

CNF – Fator de Confiança

CLP – Controle Lógico Programável

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 – Aplicando o conceito de IA no computador..... | 5 |
| Figura 1.2 – As disciplinas da IA e suas aplicações..... | 8 |
| Figura 1.3 – Estrutura de um sistema especialista..... | 10 |
| Figura 1.4 – Sistema baseado em conhecimento <i>versus</i> sistema especialista..... | 14 |
| Figura 1.5 – Arquitetura do sistema baseado em conhecimento..... | 15 |
| Figura 1.6 – Árvore de regras..... | 17 |
| Figura 1.7 – Forças em uma junta parafusada..... | 27 |
| Figura 1.8 – Força de união função do coeficiente de atrito..... | 30 |
| Figura 1.9 – Característica de proporcionalidade de fixação..... | 30 |
| Figura 1.10 – Exemplo de parafuso com classe 8.8..... | 33 |
| Figura 1.11 – Exemplo de junta rígida..... | 36 |
| Figura 1.12 – Comportamento da junta rígida..... | 37 |
| Figura 1.13 – Exemplo de junta flexível..... | 37 |
| Figura 1.14 – Comportamento de uma junta flexível..... | 38 |
| Figura 1.15 – Definição de torque..... | 39 |
| Figura 1.16 – Força de união função do alongamento..... | 41 |
| Figura 1.17 – Região plástica e elástica..... | 42 |
| Figura 1.18 – Processo de aperto por torque e ângulo..... | 42 |
| Figura 1.19 – Histograma..... | 48 |
| Figura 1.20 – Curva de gauss..... | 49 |
| Figura 1.21 – Intervalo (a,b)..... | 50 |
| Figura 1.22 – Interpretação de histograma 1..... | 51 |
| Figura 1.23 – Interpretação de histograma 2..... | 51 |
| Figura 1.24 – Interpretação de histograma 3..... | 52 |
| Figura 1.25 – Gráfico de controle..... | 53 |
| Figura 1.26 – Itens produzidos fora da especificação..... | 54 |
| Figura 1.27 – Processo descentralizado..... | 55 |
| Figura 3.1 – Malha aberta e fechada..... | 60 |
| Figura 3.2 – Fotos dos testes laboratoriais para coleta dos valores de torque..... | 61 |
| Figura 3.3 – Informações sobre a base de dados..... | 63 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.4 – Cadastro das variáveis e valores..... | 64 |
| Figura 3.5 – Definição da variável objetivo..... | 65 |
| Figura 3.6 – Definição das perguntas de interface com usuário..... | 66 |
| Figura 3.7 – Cadastro de nova regra de produção..... | 67 |
| Figura 3.8 – Edição de uma regra de produção..... | 68 |
| Figura 3.9 – Regra de produção editada e cadastrada na base de dados..... | 68 |
| Figura 4.1 – Planilha para coleta de dados, torque (Nm)..... | 69 |
| Figura 4.2 – Comportamento do equipamento parafusadeira eletrônica..... | 70 |
| Figura 4.3 – Comportamento do equipamento parafusadeira elétrica..... | 71 |
| Figura 4.4 – Comportamento do equipamento parafusadeira pneumática..... | 72 |
| Figura 4.5 – Comportamento do equipamento torquímetro analógico..... | 73 |
| Figura 4.6 – Tempo de operação no processo de montagem..... | 74 |
| Figura 4.7 – Tela inicial do sistema “SEVAT” | 77 |
| Figura 4.8 – Tela de escolha da criticidade de junta..... | 78 |
| Figura 4.9 – Tela de especificação do parafuso..... | 79 |
| Figura 4.10 – Tela de definição da classe do parafuso..... | 80 |
| Figura 4.11 – Tela de definição da lubrificação do parafuso..... | 81 |
| Figura 4.12 – Tela de apresentação dos resultados..... | 82 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1.1 – Principais diferenças entre os sistemas convencionais e os sistemas baseados em conhecimento..... | 13 |
| Tabela 1.2 – Características de algumas ferramentas de apoio..... | 25 |
| Tabela 1.3 – Características de algumas “Shells”..... | 26 |
| Tabela 1.4 – Módulo de elasticidade de alguns materiais..... | 29 |
| Tabela 1.5 – Diferentes classes de parafusos (ISO 898/1)..... | 34 |
| Tabela 1.6 - Distribuição de frequências do diâmetro interno de uma haste, em mm..... | 48 |
| Tabela 1.7 – Correlação entre os conceitos de Cp e Cpk..... | 56 |
| Tabela 3.1 – Lista de materiais..... | 59 |
| Tabela 3.2 – Coleta de dados nos processos de manufatura..... | 62 |
| Tabela 4.1 – Resultado do experimento cálculo <i>versus</i> consulta..... | 76 |

LISTA DE EQUAÇÕES

| | |
|---|----|
| Equação 1.1 – Força de tração inicial (F_i)..... | 28 |
| Equação 1.2 – Constante elástica..... | 28 |
| Equação 1.3 – Força de união (F_u)..... | 29 |
| Equação 1.4 – Definição de torque..... | 38 |
| Equação 1.5 – Cálculo da capacidade do processo (C_p)..... | 54 |
| Equação 1.6 – Cálculo da capacidade do processo (C_{pk})..... | 55 |
| Equação 4.1 – Força de união (F_u) aplicação..... | 75 |

RESUMO

Este trabalho de pesquisa aborda especificamente as técnicas de parafusamento para junção de materiais. O setor industrial utiliza essas técnicas nos processos de fabricação, principalmente na área automotiva, que ao manufaturar um veículo efetua aproximadamente 3000 apertos.

O controle dos parâmetros é fundamental na fixação dos componentes, considerando que a criticidade das juntas envolve segurança, confiabilidade e satisfação do usuário. Os parâmetros de aperto em alguns casos mais específicos são definidos através de experiência prática, utilizando-se equipamentos como parafusadeira, porém a maioria dos problemas é resolvida através de cálculos matemáticos com equações baseadas em teorias, que consideram todos os fatores influentes na junção, tais como: o tipo de junta, a especificação do parafuso e a condição de fixação desejada que são características críticas na determinação da força de união adequada entre as superfícies, para obter-se o valor de torque adequado.

Considerando-se a importância de controlar os parâmetros de aperto, foi desenvolvido um sistema inteligente, denominado por “SEVAT” (Sistema Especialista para Valores de Torque), que utiliza uma ferramenta computacional "Shell" desenvolvida no ambiente "Delphi" que especifica a condição de aperto ideal a partir dos dados armazenados. Esse sistema utiliza também a inferência, com parâmetros pré-definidos que funcionam como interpretador e direcionam rapidamente a tomada de decisão.

Palavras-chave: Sistema Inteligente, Controle de Parâmetros, Força de União, Torque e Junta.

ABSTRACT

This work presents an approach to the tightening techniques specifically to materials join. The industrial area utilize this techniques on the manufacturing process, mainly of automotive area that make a vehicle to carry out 3000 tights approximately.

The parameters control is fundamental on the components join, considering that joint criticality involve safety, reability and customer satisfaction. The tightening parameters in a specific cases are defined through experience practice using the equipments like screwdrives, however, the most of problems is resolved through matematics calculus, with the equations based in theories that considering all the influential factors joints, factors like: joints type, bolts and screw specification and the best tightening condition, are critical characteristics on the adequate clamping force determination to obtain the correct torque value.

Considering the importance of control tightening parameters, was development a intelligence system, denominate "SEVAT" (Specialist System to Torque Values), through the computacional tool "Shell" with the programming language in "Delphi" that specify the ideal tightening condition from stored datas, and using the inference, with the parameters pre-established, working like "filters" and quickly direct a make decision.

Key-words: Intelligence System, Parameters Control, Clamping Force, Torque and Joint.

INTRODUÇÃO

A indústria automobilística atualmente faz uso de diversos tipos de materiais para manufaturar um veículo automotor, esses materiais por sua vez passam por processos de montagem, que necessitam de tratamento específico e manuseio adequado, tornando-se componentes essenciais para formação do produto. Após essas operações, inicia-se o processo de montagem no veículo, onde esses componentes precisam ser fixados, utilizando-se técnicas de junção de materiais, como rebiteagem, soldagem, parafusamentos, prensagem, entre outras operações.

O foco de estudo deste trabalho, baseia-se, especificamente, em operações de parafusamento para fixação desses componentes, visto que, é uma das técnicas mais utilizada na indústria automobilística.

A complexidade é grande para definir os parâmetros de aperto para aplicação nas operações de parafusamento, pois existem diversas condições de montagem, formando juntas rígidas e flexíveis, como: fixação de "Alumínio com Plástico", "Aço com Aço", "Aço com Alumínio", "Aço com Plástico", "Plástico com Plástico", "Aço com Borracha", entre outras, além dos diversos tipos de parafusos, como: parafusos de cabeça cilíndrica com sextavado interno, parafusos de cabeça sextavada com flange e sem flange, parafusos Tribolar, parafuso "high low", etc..., com esta condição, é necessário ter conhecimento técnico especializado, considerando a experiência do engenheiro para definir a condição ideal de parafusamento. Os parâmetros de aperto são vitais para garantir a perfeita fixação desses componentes e o perfeito funcionamento do veículo, além de garantir a segurança do usuário.

Esses parâmetros de aperto precisam ser controlados para garantir a perfeita junção das partes unidas e para isso precisam de métodos confiáveis de controle e que independam da atenção do operador para monitorar esses dados.

Os objetivos principais deste trabalho, são:

1. Provar estatisticamente que o controle automático dos parâmetros de aperto é muito mais eficaz que o controle manual.
2. Provar que através da utilização de um banco de dados automatizado é possível economizar tempo e mão-de-obra especializada para definir os parâmetros de aperto.

Para atingir esses objetivos, serão realizadas pesquisas no chão de fábrica para coleta dos dados existentes, utilização da literatura atual e consulta aos dados disponíveis na indústria através de manuais, catálogos e registros, levando em consideração as diversas aplicações.

Através de pesquisas sobre inteligência artificial, será utilizado uma ferramenta para criação de um sistema especialista, utilizando-se do conhecimento adquirido e da experiência do engenheiro para ordenar e estruturar os dados, de forma a tornar a fonte de pesquisa e tomada de decisão fácil e rápida.

Capítulo 1 – Revisão da Literatura

1.1. Conceitos e Definições de Inteligência Artificial.

O principal objetivo da inteligência artificial (IA) é fazer o computador “pensar”. Porém, para fazer um computador pensar, é necessário que o mesmo execute um programa “pensante” que também pode ser chamado de programa inteligente.

Os computadores são adaptados para executar esse tipo de tarefa, sendo assim, os computadores normalmente realizam tarefas tais como: agrupar, armazenar e recuperar as informações, de modo que isto satisfaz o primeiro requisito para a inteligência.

Contudo, é exatamente na simulação do raciocínio que a inteligência artificial (IA) concentra seus esforços.

Allan Turing, em 1936, desenvolveu um teste para determinar se o computador exibe um comportamento inteligente, o qual chamou de TESTE DE TURING. De acordo com o TESTE DE TURING, o computador pode ser considerado rápido somente quando há a interferência do homem conversando entre ambos. A idéia do teste de Turing tem sido desafiada por John Searle, (Bourbaki,1990), e contradiz com a definição de Rich e Knight (1991). (TURBAN, Efraim; ARONSON, Jay e., 2001)

As definições e as características de inteligência artificial (IA) estão direcionadas para a tomada de decisão e solução de problemas, como é mostrado na Figura 1.1.

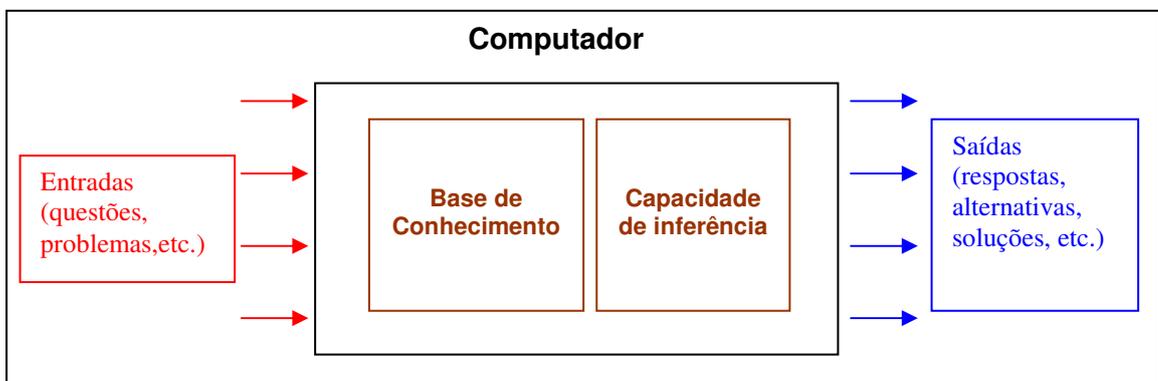


Figura 1.1 – Aplicando o conceito de IA no computador.

1.2. Comparação entre Inteligência Artificial e Inteligência Natural.

O Valor potencial da Inteligência Artificial (IA) poder ser melhor entendida pela comparação com a inteligência natural ou humana (TURBAN, Efraim; ARONSON, Jay e., 2001). A Inteligência Artificial (IA) tem várias vantagens comerciais importantes:

- ✓ **A Inteligência Artificial (IA) é mais permanente.** A inteligência natural é deteriorada do ponto de vista comercial, pois os profissionais podem trocar o seu local de trabalho ou esquecer uma informação. Por outro lado, a inteligência artificial (IA) permanece por um longo tempo no sistema do computador e os programas permanecem inalterados. Contudo a inteligência artificial tem seu valor se a inteligência natural for documentada em tempo apropriado.
- ✓ **A Inteligência Artificial oferece fácil duplicação e dissiminação.** A transferência da base de conhecimento de uma pessoa para outra usualmente requer um processo demorado de aprendizado; então, especialidades podem ser raramente duplicadas completamente. Por outro lado, quando o conhecimento é incluído em um sistema de computador, pode ser transferido de um computador para outro através da internet ou intranet.
- ✓ **A Inteligência Artificial pode ser mais barata que a inteligência natural.** Existem várias circunstâncias em que os custos dos serviços de compras de computadores são menores do que ter um profissional dedicado para a mesma tarefa. Isto é verdade quando o conhecimento é dissimulado sobre a "WEB", onde vários profissionais podem consultar e ter acesso a informações dos quais não possuem domínio e conhecimento.
- ✓ **A Inteligência Artificial pode ser documentada.** Decisões tomadas pelo computador podem ser facilmente documentadas pelo seguimento de atividades do sistema. Inteligência Natural é difícil de documentar. Por exemplo, uma pessoa pode pesquisar e concluir, mas ao passar do tempo pode ser incapaz de recriar o processo de raciocínio que o conduziu à conclusão, ou regressar às considerações que fizeram parte da decisão.

- ✓ **A inteligência artificial pode com certeza realizar tarefas muito mais rápido do que um profissional pode.**
- ✓ **A inteligência artificial pode com certeza executar tarefas melhor do que um ou mais profissionais, desde que a base de dados seja consistente e confiável e os profissionais que a utilizam sejam bem treinados.**

Inteligência Natural tem várias vantagens sobre a Inteligência Artificial, como:

- ✓ **Inteligência natural é criativa**, ao passo que inteligência artificial é pouco inspirada. A habilidade de adquirir conhecimento é inerente do ser humano, mas com IA, o conhecimento deve ser adaptado cuidadosamente no sistema estruturado.
- ✓ **Inteligência natural permite às pessoas um benefício próprio e usa a experiência sensorial diretamente**, ao passo que a maior parte de sistemas de IA devem trabalhar com entrada de dados simbólicas e representações.

Talvez o mais importante, o raciocínio humano usa o contexto de experiência global o tempo todo e dá sustentação aos problemas individuais. Em contraste, sistemas de IA tipicamente ganham seu poder por terem um foco muito restrito.

A vantagem da inteligência natural sobre a inteligência artificial mostra as várias limitações aplicadas na tecnologia de inteligência artificial. De qualquer forma, em vários casos de tecnologia de inteligência artificial mostram melhorias significantes em produtividade e qualidade.

1.3. Campo da Inteligência Artificial.

Inteligência artificial não é para si mesma um campo comercial, é a ciência e tecnologia (TURBAN, Efraim; ARONSON, Jay e., 2001). IA é uma coleção de conceitos e idéias que são apropriadas para pesquisa, porém não podem ser comercializadas. Por outro lado, IA prove o fundamento científico de diversas tecnologias comerciais, como mostra a Figura 1.2.

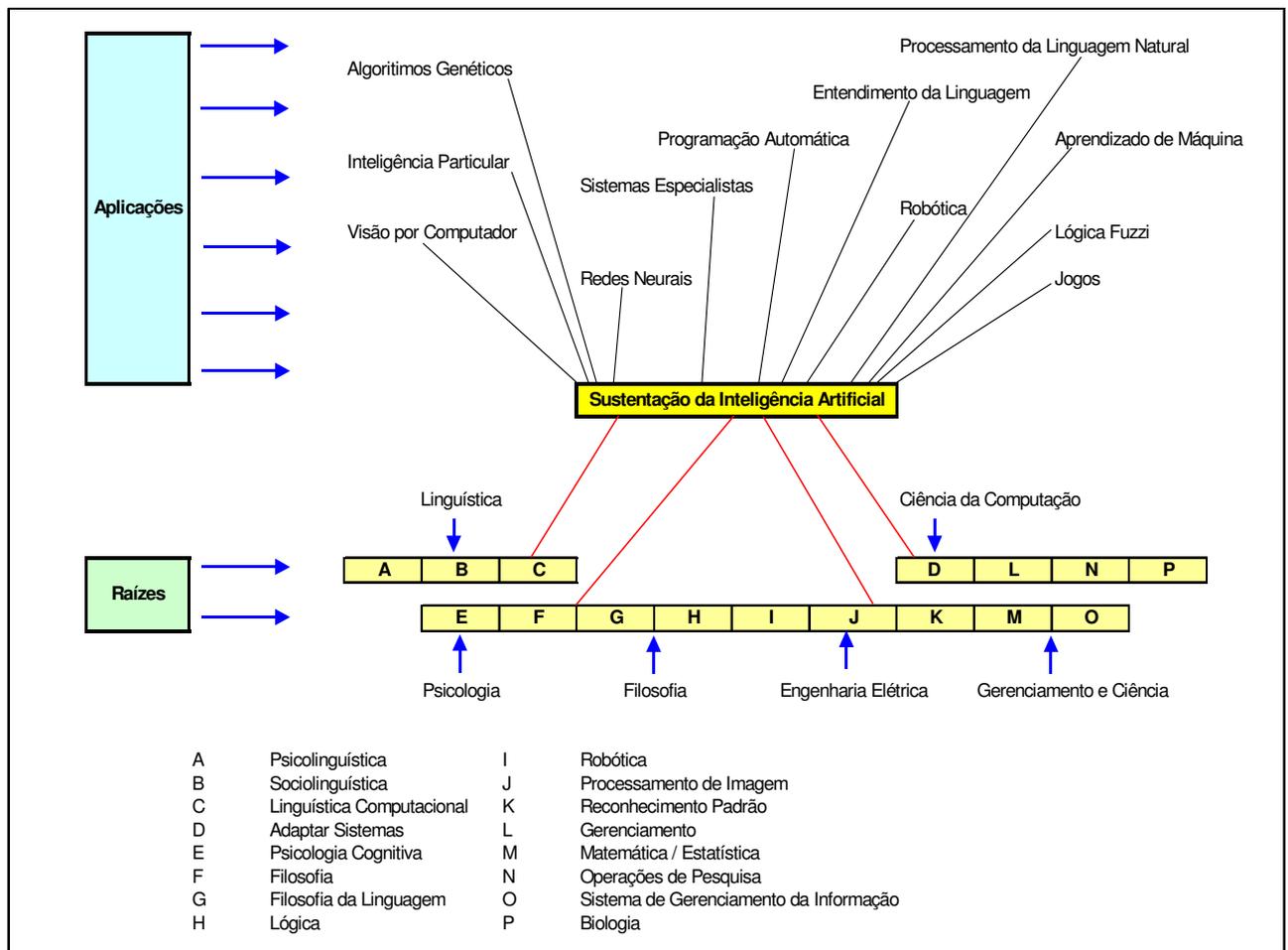


Figura 1.2 – As disciplinas da IA e suas aplicações.

1.4. Sistema Especialista (SE).

O nome Sistemas Especialistas (SE) é derivado do termo *Sistema Especialista Baseado em Conhecimento*. Algumas definições de sistemas especialistas são citadas abaixo:

“Um Sistema Especialista captura o conhecimento humano e utiliza-o através do computador para solução de problemas. Um sistema bem projetado imita o uso do processo de raciocínio do especialista para resolver problemas específicos” (TURBAN, Efraim; ARONSON, Jay e., 2001).

“Sistemas Especialistas são Sistemas Baseados em Conhecimento (SBC) que resolvem problemas ordinariamente resolvidos por um especialista humano” (REZENDE, Solange, 2003).

Na Figura 1.3, pode-se verificar uma estrutura de um Sistema Especialista desenvolvido por Efraim e Aronson (2001), onde mostra que existem dois ambientes: o ambiente de desenvolvimento e o ambiente de consulta.

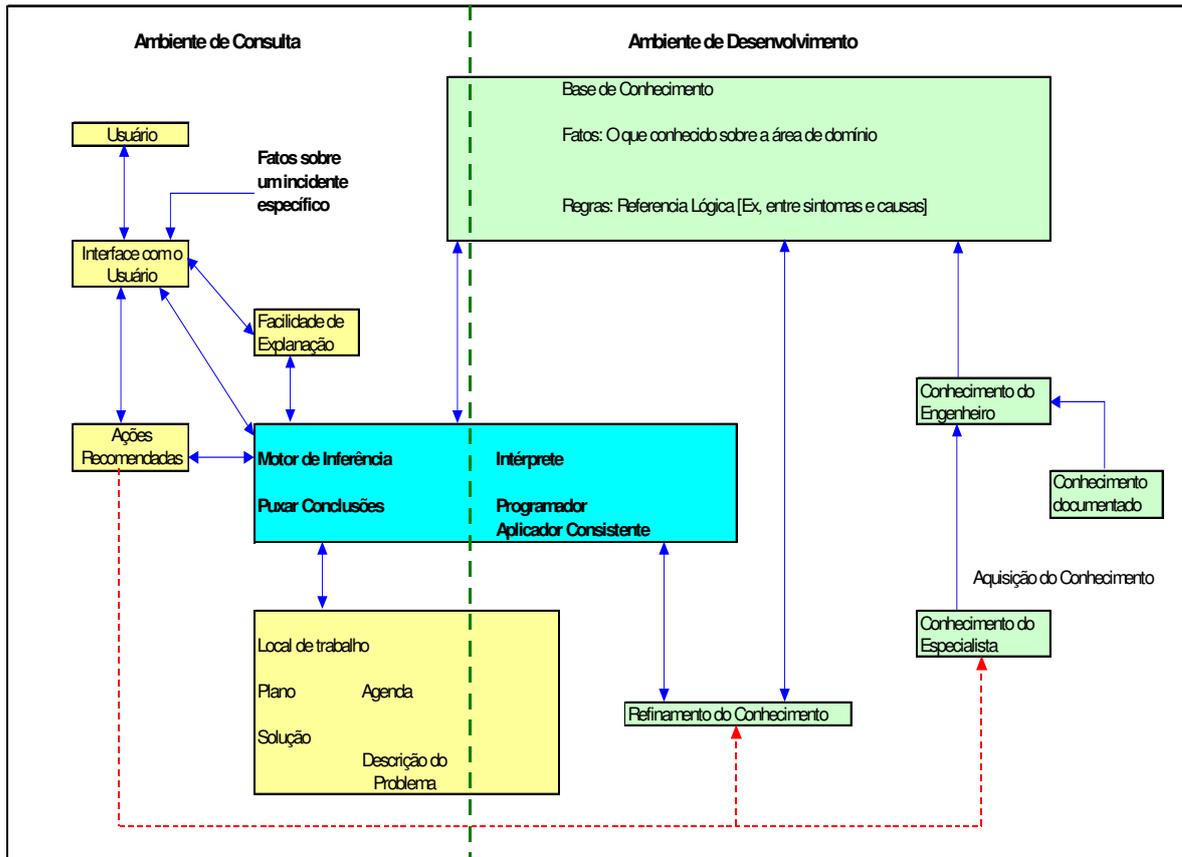


Figura 1.3 – Estrutura de um sistema especialista.

1.4.1 – O Elemento Humano.

O desenvolvimento de um sistema especialista pode ser composto de vários elementos humanos, no mínimo dois, o construtor e o usuário, além do engenheiro de conhecimento e o especialista. (TURBAN, Efraim; ARONSON, Jay e., 2001). Abaixo são descritos as definições destes elementos:

(i) O Especialista:

“É a pessoa que tem acumulado muita habilidade de tratar de problemas em particular na área chamada de domínio da competência” (WINSTON, 1992).

“É a pessoa que tem um conhecimento especial, julgamento, experiência e métodos, com a habilidade de aplicar estes talentos e dar conselhos e resolver problemas” (TURBAN, Efraim; ARONSON, Jay e., 2001).

(ii) A Engenharia do Conhecimento:

“É a pessoa que ajuda o especialista a estruturar o problema, interpretando e interagindo as respostas humanas para as questões, desenhando analogias, fazendo contra-exemplos e dando clareza a dificuldades conceituais” (TURBAN, Efraim; ARONSON, Jay e., 2001).

“A engenheira de conhecimento atua no campo para observar a área de domínio do especialista, ele formula questões, buscando respostas para situações específicas” (WINSTON, 1992).

(iii) O Usuário:

Em sistemas especialistas temos várias classes de usuário:

- ✓ O cliente não especialista que aguarda uma resposta direta. Neste caso, o sistema especialista atua como consultor ou conselheiro.
- ✓ Um estudante que quer aprender. Neste caso, o sistema especialista atua como instrutor.
- ✓ Um construtor do sistema especialista que quer melhorar ou aumentar a base de conhecimento. Aqui, o sistema especialista funciona como um parceiro.
- ✓ Um especialista. O sistema especialista atua como um assistente.

(iv) Outros Participantes:

Vários participantes podem ser envolvidos em sistemas especialistas. Por exemplo, o construtor do sistema ou analista de sistema podem integrar o sistema especialista com um outro sistema computadorizado. Um construtor de ferramentas pode prover ou construir ferramentas específicas. Vendedores podem fornecer ferramentas e dispositivos e o “Staff” pode oferecer suporte e ajuda técnica.

1.5. Sistema Baseado em Conhecimento (SBC).

1.5.1 – Conceitos e Definições.

“Sistemas Baseados em Conhecimento são programas de computador que usam o conhecimento representado explicitamente para resolver problemas” (REZENDE, Solange, 2003).

“Sistemas Baseados em Conhecimento são programas desenhados para atuar como especialista na solução de problemas específicos” (KRISHNAMOORTHY e RAJEEV, 1996).

Considerando estes conceitos e definições, verifica-se que estes programas manipulam conhecimento e informação de forma inteligente e são desenvolvidos para serem usados em problemas que requerem uma quantidade considerável de conhecimento humano e de especialização. Assim, conhecimento e processo de resolução de problemas são pontos centrais no desenvolvimento de um Sistema Baseado em Conhecimento.

Algumas literaturas enfatizam a diferença entre os diversos sistemas, como é destacado na Tabela 1.1, onde são comparadas as diferenças entre os sistemas convencionais e os Sistemas Baseados em Conhecimento. Na Figura 1.4, é mostrado as diferenças entre um Sistema Especialista e o Sistema Baseado em Conhecimento. (REZENDE, Solange, 2003).

Tabela 1.1 – Principais diferenças entre os Sistemas Convencionais e os Sistemas Baseados em Conhecimento. (Cortesia do livro *Sistemas Inteligentes*, REZENDE, Solange, 2003)

| Sistemas Convencionais | Sistemas Baseados em Conhecimento |
|---|---|
| Estrutura de Dados | Representação do Conhecimento |
| Dados e Relações entre os Dados | Conceitos, Relações entre Conceitos e Regras |
| Tipicamente usa algoritmos determinísticos | Busca Heurística |
| Conhecimento embutido no código do programa | Conhecimento representado explicitamente e separado do programa que o manipula e interpreta |
| Explicação do raciocínio é difícil | Podem e devem explicar seu raciocínio |

Analisando a Tabela 1.1, verifica-se que Sistemas Baseados em Conhecimento diferem dos Sistemas Convencionais em: como são organizados, como incorporam conhecimento, como executam e a impressão que causam aos usuários com os quais interagem.

A diferenças entre os Sistemas Baseados em Conhecimento e os Sistemas Especialistas podem ser observadas na Figura 1.4. De forma geral, pode se dizer que os Sistemas Baseados em Conhecimento são capazes de resolver problemas usando conhecimento específico sobre o domínio da aplicação, enquanto os Sistemas Especialistas são Sistemas Baseados em Conhecimento que resolvem problemas ordinariamente resolvidos por um especialista humano. Por isso, requerem conhecimento sobre a habilidade, a experiência e as heurísticas usadas pelo especialista.

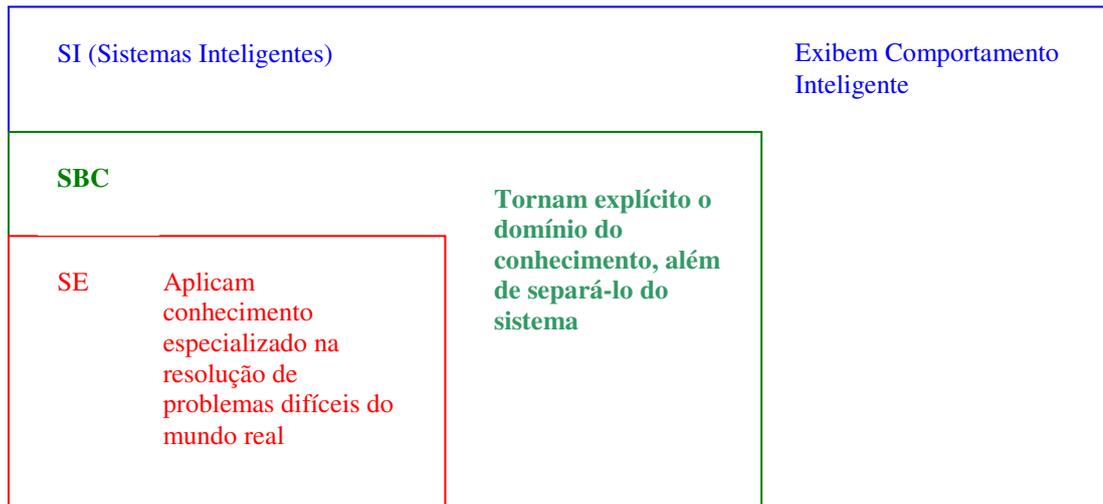


Figura 1.4 – Sistema baseado em conhecimento *versus* sistema especialista.

1.5.2 – Arquitetura do SBC.

“A base de conhecimento e o motor de inferência em uma ou mais formas de mecanismos de inferência são os maiores componentes de um sistema especialista” (KRISHNAMOORTHY e RAJEEV, 1996).

Em sistemas especialistas, é necessário armazenar fatos e estes fatos representam um contexto, que são chamados também de memória de trabalho.

Estes fatos são obtidos através de informações e dados de um especialista, que utiliza o conhecimento e o contexto para responder as questões, “Como a decisão é tomada? Ou por que o dado é necessário?”. Este módulo é chamado de facilidade de explicação e simula o processo de respostas dos “Porquês” e “Como”.

O processo de coleta, organização e compilamento do conhecimento implementando na forma de base de conhecimento é uma tarefa laboratorial, porém não é a finalização do desenvolvimento do sistema. A base de conhecimento deve ser continuamente atualizada, conforme o domínio do conhecimento aumenta.

A facilidade de se adquirir o conhecimento está entre a interface do especialista e a engenheira de conhecimento, formando um componente do sistema especialista.

O usuário do sistema especialista tem interação no fornecimento de dados, definindo fatos e monitorando o resultado da solução do problema.

A transmissão da informação pode ser na forma textual ou gráfica, ficando a critério do usuário. O módulo de interface do usuário é capaz de manusear estas informações na forma textual ou gráfica. Na Figura 1.5, é mostrado a arquitetura de um sistema baseado em conhecimento (SBC) com os componentes e como os mesmos interagem entre si.

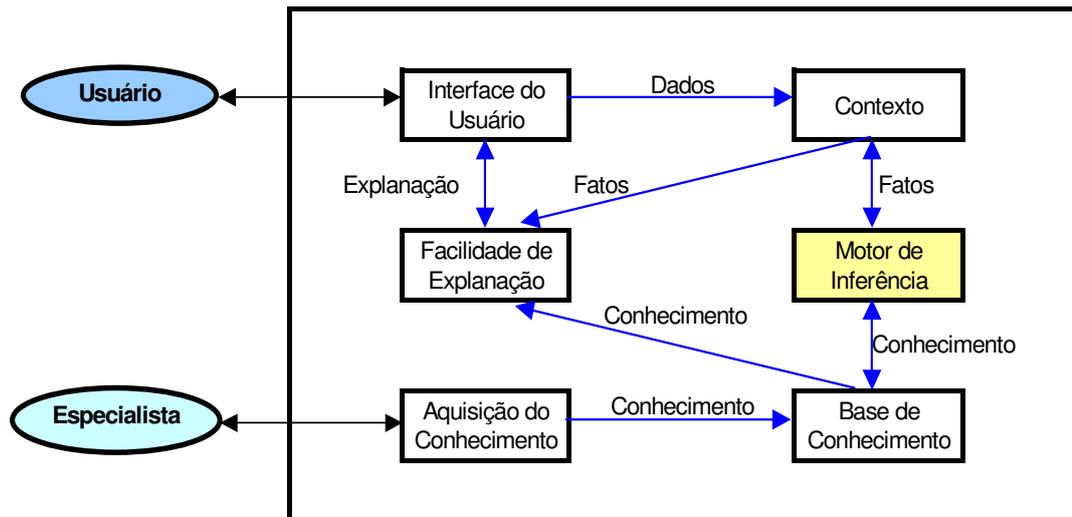


Figura 1.5 – Arquitetura do sistema baseado em conhecimento.

Como mostrado na Figura 1.5, o motor de inferência e a base de conhecimento são os componentes mais importantes num sistema baseado em conhecimento.

1.5.2.1 – Base de Conhecimento.

A base de conhecimento contém um domínio específico do conhecimento adquirido para solucionar um problema. O conhecimento é criado por um engenheiro de conhecimento, que conduz uma série de entrevistas e pesquisas com um especialista e organiza o conhecimento em uma forma que pode ser diretamente usada por um sistema.

A base de conhecimento inclui dois elementos básicos: 1) Fatos sobre a situação do problema e teoria sobre a área do problema, e 2) Heurísticas especiais ou regras que

direcionam o uso do conhecimento para solucionar problemas específicos (TURBAN, Efraim; ARONSON, Jay e., 2001).

Os conhecimentos para solução de problemas em engenharia podem ser classificados em três categorias: 1) Conhecimento compilado, 2) Conhecimento qualitativo e 3) Conhecimento quantitativo (KRISHNAMOORTHY e RAJEEV, 1996).

Informalmente, uma base de conhecimento é um conjunto de representações de ações e acontecimentos do mundo. Cada representação individual é chamada de sentença. As sentenças são expressas em uma linguagem específica, chamada de linguagem de representação de conhecimento [Russel & Norvig, 1995]. Linguagem de representação de conhecimento baseia-se em diferentes técnicas de representação, como: regras de produção, redes semânticas, frames, lógicas e programas convencionais. (REZENDE, Solange, 2003).

1.5.2.2 – Motor de Inferência.

O cérebro do sistema especialista é o motor de inferência, também conhecido como estrutura de controle ou interpretador de regras. Este componente é essencial num programa de computador que disponibiliza uma metodologia para raciocínio sobre a informação na base de conhecimento. Este componente mostra direções sobre como usar o sistema de conhecimento, desenvolvendo uma agenda que organiza e controla os passos tomados para solucionar os problemas.

Existem basicamente dois modos de raciocínio aplicáveis a regras de produção (BITTENCOURT, 1995):

1. *Encadeamento progressivo* ou *encadeamento a frente* (do inglês, “forward chaining”),
2. *Encadeamento regressivo* ou *encadeamento para trás* (do inglês, “backward chaining”).

No encadeamento progressivo, também chamado encadeamento dirigido por dados, a parte esquerda da regra é comparada com a descrição da situação atual, contida na memória de trabalho. As regras que satisfazem a esta descrição têm sua parte direita

executada, o que, em geral, significa a introdução de novos fatos na memória de trabalho.

No encadeamento regressivo, também chamado encadeamento dirigido por objetivos, o comportamento do sistema é controlado por uma lista de objetivos. Um objetivo pode ser satisfeito diretamente por um elemento da memória de trabalho ou podem existir regras que permitam inferir algum dos objetivos correntes, isto é, que contenham uma descrição deste objetivo em suas partes direitas. As regras que satisfazem esta condição têm as instâncias correspondentes às suas partes esquerdas adicionadas à lista de objetivos correntes. Caso uma dessas regras tenha todas as suas condições satisfeitas diretamente pela memória de trabalho, o objetivo em sua parte direita é também adicionado à memória de trabalho. Um objetivo que não possa ser satisfeito diretamente pela memória de trabalho, nem inferido através de uma regra, é abandonado. Quando o objetivo inicial é satisfeito, ou não há mais objetivos, o processamento termina.

A hipótese de uma regra pode ser usada como evidência para outra, assim é possível construir uma hierarquia de evidências, regras e hipóteses (WINSTANLEY, 1991), como representado na Figura 1.6.

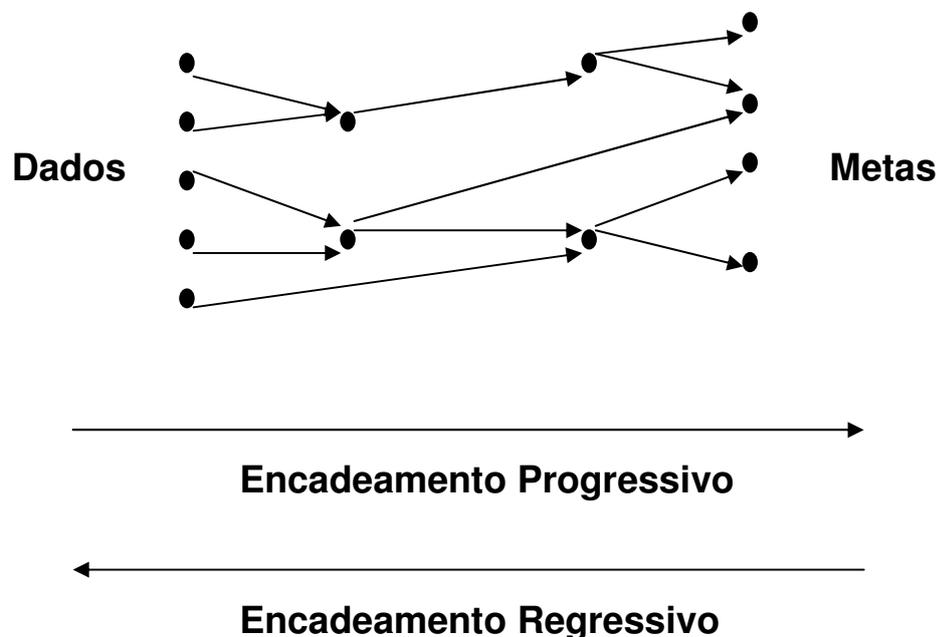


Figura 1.6 – Árvore de regras.

O motor de inferência controla a atividade do sistema. Esta atividade ocorre em ciclos, cada ciclo consistindo em três fases (BITTENCOURT, 1995):

1. Correspondência de dados, onde as regras que satisfazem a descrição da situação atual são selecionadas.
2. Resolução de conflitos, onde as regras que serão realmente executadas são escolhidas dentre as regras que foram selecionadas na primeira fase e ordenadas.
3. Ação, a execução propriamente dita das regras.

As principais vantagens dos sistemas de produção como método de representação de conhecimento são (WATERMAN, 1986): modularidade, uniformidade e naturalidade.

As principais desvantagens são: ineficiência em tempo de execução e complexidade do fluxo de controle que leva à solução dos problemas. Neste caso, para sistemas complexos que possuem uma grande quantidade de variáveis e que necessitam de uma análise e triagem das informações para tornar o sistema mais otimizado.

Estas vantagens e desvantagens determinam as características que devem ter os domínios que se adaptam ao desenvolvimento de Sistemas Especialistas Baseados em Conhecimento:

1. Ser descrito por um conhecimento consistindo em um conjunto muito grande de fatos parcialmente independentes;
2. Dispor de métodos de solução consistindo de ações independentes, e;
3. Apresentar uma nítida separação entre conhecimento e ação.

1.5.2.3 – Interface com o Usuário.

A interface é responsável pela comunicação entre o Sistema Baseado em Conhecimento e o usuário, proporcionando intermediações entre a representação interna do sistema e a representação mental do usuário.

Diferentes tipos de linguagens podem ser usados na interface de um Sistema Baseado em Conhecimento. Inicialmente procurou-se construir interfaces que utilizassem a linguagem natural do usuário, por exemplo, o português (REZENDE,

Solange, 2003). Isso é inviável porque o uso amplo e abrangente de processamento de linguagem natural é um problema computacionalmente difícil quanto ao tratamento.

Algumas técnicas tornam a interface com o usuário mais amigável, por exemplo, o uso de janelas, menus, gráficos de alta resolução, animação, cores, etc. De todo modo, as telas a serem apresentadas ao usuário devem ser de fácil compreensão e as explicações necessárias devem ser claras e diretas (BITTENCOURT, 1995).

Podem-se citar mais algumas características para interfaces com o usuário:

1. Disponibilidade de diversos tipos de interfaces, adaptadas ao tipo de usuário (iniciante, especialista);
2. Possibilidade de interromper a execução do sistema em um determinado ponto e poder retomá-la sem necessidade de re-processamento;
3. Mensagens de erro claras e informativas;
4. Possibilidade de alterar certas entradas ao sistema e comparar os resultados obtidos;
5. Capacidade de capturar e armazenar telas de execução. Os aspectos considerados críticos foram: facilidade para explicação e documentação.

1.5.2.4 – Representação do Conhecimento.

A variedade de esquemas de representação de conhecimento tem sido desenvolvida ao longo dos anos, esses esquemas possuem duas características comuns (TURBAN, Efraim; ARONSON, Jay e., 2001):

1. Podem ser programados com linguagens de computador existentes e armazenados na memória;
2. São desenhados para que fatos e conhecimentos contidos neles possam ser usados no raciocínio.

Uma representação do conhecimento pode ser entendida como uma forma sistemática de estruturar e codificar o que se sabe sobre uma determinada aplicação. (REZENDE, Solange, 2003). Existem diversas técnicas de representação do

conhecimento e para avaliar essas técnicas existem alguns critérios, dos quais os principais são:

1. Adequação lógica que observa se o formalismo usado é capaz de expressar o conhecimento que se deseja representar,
2. Conveniência notacional, que verifica as convenções da linguagem de representação. Se essas forem muito complicadas, a tarefa de codificação torna-se extremamente complexa.

Alguns poucos Sistemas Especialistas possuem os chamados sistemas híbridos de representação de conhecimento (NEBEL e VON LUCK, 1987) que, além de possuir diversos formalismos de representação, dispõem também de algoritmos de acesso que integram os conhecimentos representados nos diversos formalismos para permitir sua utilização de maneira integrada.

Os esquemas de representação de conhecimento mais utilizados são:

1. Regras de produção;
2. Redes Semânticas;
3. “Frames”.

Esta pesquisa trata especificamente de regras de produção. A seguir é apresentada a definição de regras de produção.

(i) *Regras de Produção:*

Os primeiros Sistemas Baseados em Conhecimento, foram sistemas baseados em regras [Buchanan & Shortliffe, 1984]. Esses sistemas se inspiraram na idéia que o processo de tomada de decisão humano poderia ser modelado por meio de regras do tipo se “condições” e então “conclusões e ações”. (REZENDE, Solange, 2003).

Em programação baseada em regras, usa-se um motor de inferência para manipular regras e fatos e produzir novos fatos, o que significa que pode posteriormente usar novas regras até chegar a um resultado final.

Essas regras são simplesmente um conjunto de condições no estilo SE<Condições>ENTÃO<conclusões>, com a possibilidade de inclusão de conectivos lógicos relacionando os atributos no escopo do conhecimento e o uso de probabilidades (manual do Expert SINTA, 1995).

As regras de produção são muito utilizadas por possuírem as seguintes vantagens:

1. Modularidade: cada regra, por si mesma, pode ser considerada como uma peça de conhecimento independente;
2. Facilidade de edição (uma consequência da modularidade): novas regras podem ser acrescentadas e antigas podem ser modificadas com relativa independência;
3. Transparência do Sistema: Garante maior legibilidade da base de conhecimentos.

Portanto, é preciso ter em mente que a modularidade de um sistema baseado nessa arquitetura permite a construção passo-a-passo da base de conhecimentos, ou seja, é possível realizar vários testes com apenas um subconjunto de regras concluído.

Exemplo de aplicação da regra de produção:

- Regra 1: SE iniciar um conflito internacional
ENTÃO o preço do ouro sobe
- Regra 2: SE o índice de inflação cair
ENTÃO o preço do ouro cai

Em um sistema que utiliza regras de produção, o número de regras não precisa necessariamente ser estipulado, pois o sistema pode possuir uma base de dados otimizada.

1.5.3 – Aplicações do SBC.

Sistemas Baseados em Conhecimento têm sido aplicados em diversos ramos, como negócios, medicina, ciência e engenharia. É importante ressaltar que os métodos

de resolução de problemas utilizados pelos SBCs freqüentemente variam de uma classe de problemas para outra.

A seguir, são mostrados alguns exemplos de aplicações de SBCs, adquiridos de artigos publicados nas diversas áreas de atuação.

- ✓ (BULLINGER, WARSCHAT, FISCHER, 1991) desenvolveu um sistema baseado em conhecimento para selecionar materiais para construção de novos materiais. Este sistema suporta o projetista na seleção do material ideal, observando os padrões técnicos de cura do material, selecionando alternativas técnicas e econômicas, auxiliando na decisão final.

- ✓ (SIANG, CHAN, 1991) desenvolveu um sistema especialista baseado em conhecimento para selecionar rolamentos em projetos de engenharia mecânica. Através da representação do conhecimento utilizando regras de produção, o sistema "R1-XCON" é capaz de sugerir a melhor aplicação, analisando as características operacionais dos rolamentos e sua aplicação no momento do projeto de máquinas e equipamentos.

- ✓ (BATANOV, NAGARUR e NITIKHUNKASEM, 1993) desenvolveu um sistema baseado em conhecimento para gerenciamento de manutenção. O sistema, chamado de "EXPERT-MM", é utilizado na indústria Siam Gypsum (Bangkok, Thailand) e suporta três funções principais: Sugestões de supervisão da manutenção, diagnósticos de máquina e programação da manutenção. A base de conhecimento possui 154 (cento e cinquenta e quatro) regras para diagnósticos e 54 (cinquenta e quatro) regras para selecionar o modelo de manutenção.

- ✓ (LUNN, ARCHIBALD, REDFEARN, ROBINSON, BAMIGBOYE, COPE e HIRD, 1991) desenvolveu um sistema especialista para formulação de óleos lubrificantes na utilização em motores automotivos. O sistema "XCON" auxilia na tomada de decisão através de regras de produção, o qual mistura conhecimento heurístico e raciocínio causal, com isso facilita a formulação da decisão a ser tomada.

- ✓ (VOLVO, 2002). A montadora Volvo utilizou a inteligência artificial para controlar continuamente o chassi do veículo S60 R. O sistema "FOUR C", atualiza a posição de cada amortecedor, baseando-se nas informações continuamente coletadas sobre a velocidade do carro, o giro das rodas, o movimento do chassi e a posição do volante. O sistema, então, ajusta rapidamente a ação dos amortecedores e o controle eletrônico do sistema de tração 4x4.

- ✓ (ALANI, KIM, MILLARD, WEAL, HALL, LEWIS, SHADBOLT, 2003) desenvolveu um sistema baseado em conhecimento para extrair documentos da "WEB". O projeto "Artequakt" une a ferramenta de extração do conhecimento com a antologia para alcançar o suporte contínuo do conhecimento e guiar a extração da informação.

- ✓ (FREITAS, PRADO, BATISTA NETO e NAKAMITI, 1999) utilizou a inteligência artificial para sequenciar automaticamente às ações para a produção de peças em uma célula flexível de manufatura. Para isto, desenvolveu três sistemas integrados, sendo um pré-processador "INCEL", um planejador "PLANCEL-E" e um pós-processador "POSCEL-E". Com estes sistemas integrados, foi possível explorar o uso da abordagem de planejamento baseada em casos em domínio voltado à automação industrial.

etc...

Estes exemplos citados são aplicações práticas de um SBC e é possível citar vários trabalhos utilizando esta ferramenta de inteligência artificial. O que tem se notado atualmente é que há um grande crescimento na utilização da tecnologia de sistemas baseados em conhecimento e com isso destacam-se linguagens de representação de conhecimento, como programas e "hardware" especialmente projetados para auxiliar no desenvolvimento e execução de sistemas baseados em conhecimento.

1.6. Ferramentas utilizadas para criação de Sistemas Baseados em Conhecimento.

A construção de um Sistema Baseado em Conhecimento é facilitada usando-se linguagens que ofereçam uma variedade de estruturas, tanto de dados quanto de controle (REZENDE, Solange, 2003).

Atualmente, é possível dizer que estas ferramentas são divididas em dois grandes grupos:

1. Ferramentas de apoio: geralmente oferece vários esquemas de representação de conhecimento, monitoramento de inferência, estratégias para resolução de problemas, bem como interfaces para aquisição de conhecimento e explicação.
2. "Shells": geralmente oferecem um esquema de representação de conhecimento e motor de inferência, com interface e estratégia para resolução de problemas prefixada.

As ferramentas de apoio são mais flexíveis e possuem generalidades maior, fornecendo vários recursos, porém exige do engenheiro um maior conhecimento em linguagem de programação. Por outro lado, as "Shells" permitem ao engenheiro de conhecimento definir seus próprios mecanismos de controle, porém por serem mais restritas, tendem a ser mais simples e fáceis de serem entendidas e usadas. As Tabelas 1.2 e 1.3 mostram algumas características das ferramentas de apoio e das "Shells" encontradas no mercado (fonte: Sistemas Inteligentes, fundamentos e aplicações, Solange Oliveira Rezende, 2003).

As linguagens mais utilizadas em programação de sistemas baseados em conhecimento são: COBOL, Pascal, C, C+, C++, PROLOG e LISP, e mais recentemente o ambiente DELPHI.

A Universidade Federal do Ceará desenvolveu uma "Shell" chamada de Expert SINTA, com base de programação em delphi.

Esta ferramenta computacional utiliza técnicas de Inteligência Artificial para geração automática de sistemas especialistas. O Expert SINTA utiliza um modelo de representação do conhecimento baseado em regras de produção e probabilidades, tendo como objetivo principal simplificar o trabalho de implementação de sistemas especialistas através do uso de uma máquina de inferência compartilhada, da construção

automática de telas e “menus”, do tratamento probabilístico das regras de produção e da utilização de explicações sensíveis ao contexto da base de conhecimento modelada. O Expert SINTA possui outras características, sendo: Utilização de encadeamento regressivo “backward chaining”, utilização de fatores de confiança, ferramentas de depuração e possibilidade de incluir ajudas “on-line” para cada base.

Tabela 1.2 – Características de algumas ferramentas de apoio.

| | Ferramentas | ART | Babylon | KEE | Knowledge Craft | Loops | Flex | Elements Environment |
|--------------------------------------|-------------|----------|-------------|----------------|-----------------|------------|-------------|----------------------|
| Atributos | | | | | | | | |
| Representação do Conhecimento | | | | | | | | |
| <i>Frames</i> | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim |
| Relações do sistema | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim |
| Relações do usuário | não | não | não | sim | não | sim | sim | sim |
| Orientação a objetos | limitado | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim |
| <i>Demons</i> | limitado | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim |
| Regras | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim |
| Organização hierárquica | não | Limitado | sim | não | limitado | não | não | não |
| Integração <i>frames</i> | não | não | sim | não | não | sim | sim | sim |
| Fatores de certeza | não | não | não | não | sim | não | não | não |
| Motores de Inferência | | | | | | | | |
| Forward Chaining | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim | não |
| Backward Chaining | sim | sim | sim | não | não | sim | sim | sim |
| Contexto (mundos) | sim | não | sim | limitado | não | não | não | não |
| Manutenção de verdade | sim | não | sim | não | não | não | não | não |
| Auxílio ao Desenvolvimento | | | | | | | | |
| Editor interno | sim | não | sim | sim | sim | sim | sim | sim |
| Help | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim |
| Trace and break point | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim |
| Medida de desempenho | sim | não | não | não | sim | limitado | não | não |
| Interface gráfica | sim | limitado | sim | sim | sim | não | sim | sim |
| Referências cruzadas | não | não | não | não | sim | não | sim | sim |
| Controle de versões | não | não | não | não | sim | não | não | não |
| Distribuidor | | | | | | | | |
| Companhia | Inference | GMD | Intellicorp | Carnegie Group | Xerox | LPA-Prilog | Neuron Data | |

Tabela 1.3 – Características de algumas “Shells”.

| | Shell | Insigth | KES | MED2 | M.1 | Clips | Personal Consultant | S.1 | Timm |
|---------------------------------------|-----------|--------------|----------|--------------|-----------------|----------|---------------------|-----|----------|
| Atributos | | | | | | | | | |
| Classe de Problema | | | | | | | | | |
| Interpretação | limitado | limitado | limitado | limitado | limitado | sim | limitado | sim | Limitado |
| Diagnóstico | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim |
| Monitoramento | não | não | limitado | limitado | sim | não | não | não | sim |
| Planejamento | não | não | não | limitado | sim | não | não | não | não |
| Projeto | não | não | não | limitado | limitado | não | limitado | não | não |
| Representação da Base de Conhecimento | | | | | | | | | |
| Frames | não | não | não | não | sim | sim | limitado | não | não |
| Demons | não | não | não | sim | sim | sim | sim | sim | não |
| Regras | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim |
| Motor de Inferência | | | | | | | | | |
| Forward Chaining | sim | não | sim | limitado | sim | limitado | limitado | sim | sim |
| Backward Chaining | sim | sim | limitado | sim | não | sim | sim | sim | não |
| Auxílio ao Desenvolvimento | | | | | | | | | |
| Editor da BC | sim | não | limitado | sim | sim | sim | sim | sim | não |
| Verificação de consistência | não | não | não | sim | não | não | sim | sim | sim |
| Trace | sim | sim | sim | não | sim | sim | sim | sim | sim |
| Facilidade de explicação | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim |
| Distribuidor | | | | | | | | | |
| Companhia | Level 5-R | Software A&E | Inware | Tecknowledge | Domínio Público | T1 | Tecknowledg e | GRC | |

Para desenvolvimento deste sistema baseado em conhecimento, foi utilizada a ferramenta Expert SINTA, visto que atende aos requerimentos básicos para criação do sistema especialista.

1.7. Conceitos e definições sobre Tecnologia do Aperto.

Algumas definições sobre a tecnologia do aperto que inclui os parâmetros de controle de aperto e os elementos que fazem parte do sistema de fixação, encontradas na literatura, normas e em manuais de equipamentos dentro da indústria são apresentados abaixo.

1.7.1. Força de União ou Força Inicial de Montagem.

É a força que mantém unidas as partes de uma junta, capaz de anular todas as cargas externas, conforme mostra a Figura 1.7 (ATLAS COPCO, 2004).

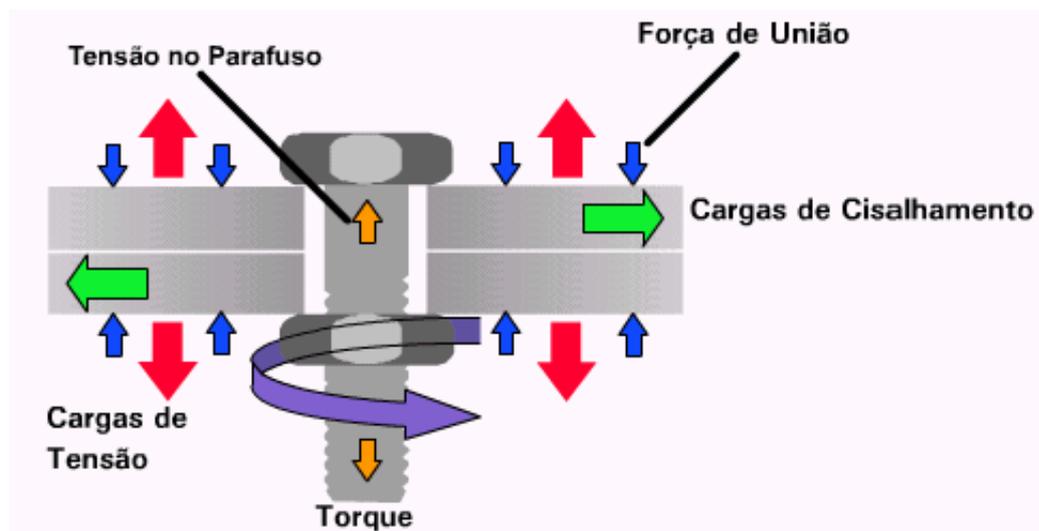


Figura 1.7 – Forças em uma junta parafusada (cortesia ATLAS COPCO).

Na junção de duas ou mais peças existem diversos fatores que são considerados para cálculo e dimensionamento do correto sistema de fixação através da utilização de parafusos.

(i) O conceito de Força de tração inicial (F_i), extraído do LIVRO ÓRGÃOS DE MÁQUINAS (RODRIGUES e LUIZ,1984], mostra estes fatores através da utilização da equação 1.1:

$$F_i = C F_e \left(\frac{K_c}{K_p + K_c} \right) \quad (1.1)$$

Onde:

K_p = constante elástica do parafuso;

K_c = constante elástica das partes comprimidas;

C = coeficiente da carga de abertura; varia entre 1,2 e 2;

F_e = carga externa (tração) no parafuso em kg.

As constantes elásticas do parafuso e das partes comprimidas (k) são calculadas conforme equação 1.2:

Equação 1.2 – Constante elástica (k):

$$k = \frac{AE}{L} \quad (1.2)$$

Onde:

A = área da seção transversal;

E = módulo de elasticidade (módulo de Young) do material;

L = comprimento sendo tracionado ou comprimido

A lei da proporcionalidade ou lei de Hooke é representada pelo diagrama Tensão contra Deformação, no qual é estabelecida uma função do tipo $\sigma = E \cdot \varepsilon$, onde E é a constante de proporcionalidade, conhecida como módulo de elasticidade ou módulo de

Young e é uma característica de cada material, como mostra a Tabela 1.4. (Fonte: Laboratório de medições mecânicas/UFRGS, Prof^o. Milton A. Zaro).

Tabela 1.4 – Módulo de elasticidade de alguns materiais.

| Metal | E (kgf/mm) |
|-----------------------|-------------------|
| Cobre | 11.900 |
| Alumínio | 7.000 |
| Aço carbono | 21.000 |
| Ferro fundido modular | 14.000 |
| Bronzes e latões | 7.700 a 11.900 |

(ii) O conceito de Força de união (F_u) extraído da literatura, pertencente à empresa Atlas Copco Tools and Assembly Systems, leva em consideração características específicas em uma junta parafusada, como mostra a equação 1.3:

$$F_u = \frac{M}{0,16P + 0,58\mu Gd_2 + 0,5\mu K D_m} \quad (1.3)$$

Onde:

F_u = Força de união;

M = Torque Aplicado;

P = Passo da rosca;

μG = Coeficiente de atrito da rosca;

μK = Coeficiente de atrito da cabeça do parafuso;

d_2 = Diâmetro primitivo;

D_m = Diâmetro médio da cabeça do parafuso.

Uma variação no atrito entre 0,10 (ligeiramente oleado) e 0,18 (seco), a variação da Força de união chega até 100%, como mostra a Figura 1.8.

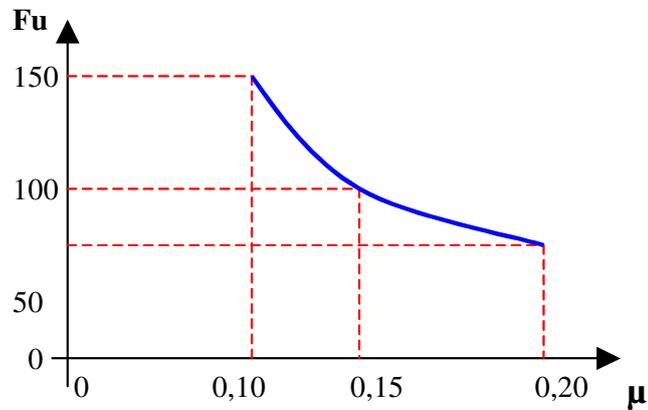


Figura 1.8 – Força de união função do coeficiente de atrito.

Na maioria das aplicações em juntas parafusadas, encontramos a seguinte característica de proporcionalidade para fixações, como mostrado na Figura 1.9:

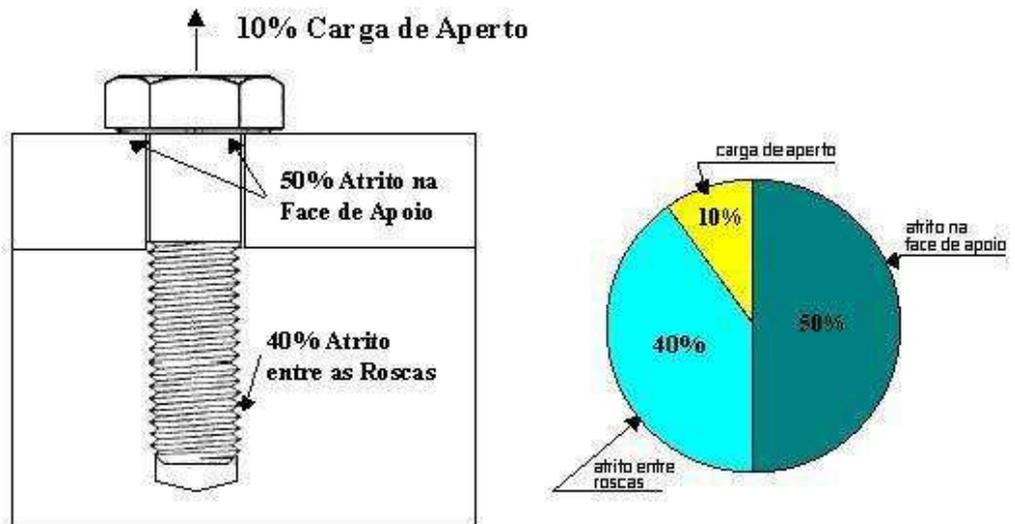


Figura 1.9 – Característica de proporcionalidade de fixação.

1.7.2 – Tipos de Rosca, Parafusos e Porcas.

1.7.2.1 – Tipos de roscas.

Rosca é uma saliência de secção constante e variável na semelhança disposta em hélice na superfície interna ou externa de um cilindro ou um cone.

Os elementos de que é composta uma conexão filetada formam um par helicoidal, isto é, um par parafuso-rosca.

As roscas, bem como os parafusos e porcas seguem uma padronização conforme normas, como exemplo, ISO, ABNT, DIN, entre outras. Dentre os tipos de roscas mais utilizados na indústria, é possível citar os seguintes:

- ✓ Rosca métrica de perfil triangular ISO;
- ✓ Rosca cilíndrica na qual o filete é disposto em uma superfície cilíndrica;
- ✓ Rosca cônica na qual o filete é disposto em uma superfície cônica;
- ✓ Roscas Whitworth – Gás;
- ✓ Rosca trapezoidal;
- ✓ Rosca dente de serra.

Um elemento roscado é definido de maneira completa, considerando as seguintes características:

- ✓ Perfil;
- ✓ Diâmetro nominal da rosca;
- ✓ Passo;
- ✓ Forma da superfície (cilíndrica ou cônica);
- ✓ Número de entradas;
- ✓ Sentido de enrolamento da hélice;
- ✓ Comprimento do espaço útil.

Considerando estas características e de acordo com a norma ABNT/NB8-65, que concordam com a recomendação ISO/R 128, é possível especificar as roscas da seguinte forma:

M8: rosca métrica ISO de perfil triangular, a passo grosso (1,25 mm), tendo diâmetro nominal de 8 mm.

$\frac{3}{4}$ W: rosca Whitworth com diâmetro $\frac{3}{4}$ " = 19,050 mm.

G $\frac{3}{4}$: rosca gás cilíndrica, com diâmetro de rosca 26,441 mm.

1.7.2.2 – Parafusos.

Algumas definições sobre parafusos encontradas na literatura são apresentadas abaixo:

“Parafuso é um eixo cilíndrico parcialmente ou completamente filetado, munido, pelo menos, de uma cabeça em uma extremidade; a forma da cabeça deve permitir a fixação do parafuso e eventualmente constituir um apoio que deve ser rigorosamente perpendicular ao eixo do parafuso propriamente dito”. (Fonte: Desenho Técnico Mecânico, volume 2: MANFÉ, POZZA, SCARATO).

“O parafuso é um mecanismo simples que encontra uma infinidade de usos. Ele não serve apenas para prender peças, mas pode ser usado em configurações que transmitem força e movimento”. (BRAGA, N.C, 2004).

Os parafusos são encontrados numa gama muito vasta de tipos para os mais variados empregos. Em geral na indústria, os tipos mais encontrados são:

- ✓ Parafusos de cabeça hexagonal;
- ✓ Parafusos de cabeça cilíndrica com hexágono embutido;
- ✓ Parafusos com entalhe de cabeça cilíndrica;
- ✓ Parafusos com entalhe de cabeça vazada plana;
- ✓ Parafusos com entalhe de cabeça cilíndrica com calota;
- ✓ Parafusos com entalhe de cabeça vazada com entalhe;

Os parafusos com rosca métrica, que são os mais utilizados na indústria, principalmente a automobilística, seguem uma classe, que definem suas características mecânicas e diretrizes de uso, conforme a norma ISO 898/1.

A qualidade dos materiais dos parafusos é padronizada, ou seja, quanto esforço de tensão um parafuso pode ser exposto antes que o ponto de escoamento (Yield Point) seja alcançado e antes que ocorra a quebra. Todos os parafusos devem ser marcados de acordo com sua classificação – um padrão que usa um sistema de dois dígitos, no qual o primeiro dígito refere-se a força de tensão mínima em 100 N/mm^2 e o segundo dígito indica a relação entre o ponto de escoamento “Yield Point” e a força de tensão mínima.

A Figura 1.10, mostra um exemplo de parafuso com classe 8.8 e seu comportamento com relação a resistência à tensão de ruptura e a Tabela 1.5 mostra as diferentes classes de parafusos.

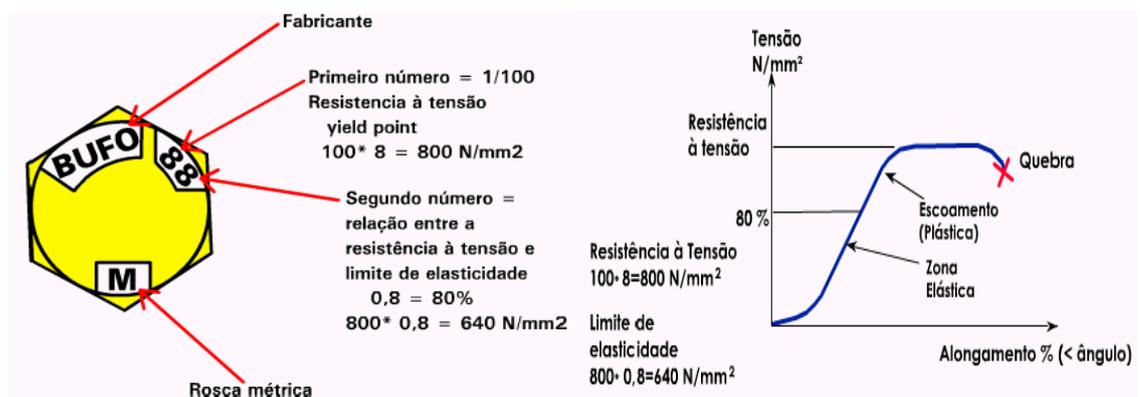


Figura 1.10 – Exemplo de parafuso com classe 8.8. (cortesia ATLAS COPCO).

Tabela 1.5 – Diferentes classes de parafusos (ISO 898/1).

| Torque Padrão (Nm) | | | | | | | |
|--------------------|---------------------------|-------|-------|------|------|-------|-------|
| Rosca | Classificação do Parafuso | | | | | | |
| | 3.6 | 4.6 | 4.8 | 5.8 | 8.8 | 10.9 | 12.9 |
| M1.6 | 0.05 | 0.065 | 0.086 | 0.11 | 0.17 | 0.24 | 0.29 |
| M2 | 0.10 | 0.13 | 0.17 | 0.22 | 0.35 | 0.49 | 0.58 |
| M2.2 | 0.13 | 0.17 | 0.23 | 0.29 | 0.46 | 0.64 | 0.77 |
| M2.5 | 0.20 | 0.26 | 0.35 | 0.44 | 0.70 | 0.98 | 1.20 |
| M3 | 0.35 | 0.46 | 0.61 | 0.77 | 1.20 | 1.70 | 2.10 |
| M3.5 | 0.55 | 0.73 | 0.97 | 1.20 | 1.90 | 2.70 | 3.30 |
| M4 | 0.81 | 1.10 | 1.40 | 1.80 | 2.90 | 4.00 | 4.90 |
| M5 | 0.60 | 2.20 | 2.95 | 3.60 | 5.70 | 8.10 | 9.70 |
| M6 | 2.80 | 3.70 | 4.90 | 6.10 | 9.80 | 4.0 | 17.0 |
| M8 | | 8.90 | 10.50 | 15.0 | 24.0 | 33.0 | 40.0 |
| M10 | | 17.0 | 21.0 | 29.0 | 47.0 | 65.0 | 79.0 |
| M12 | | 30.0 | 36.0 | 51.0 | 81.0 | 114.0 | 136.0 |
| M14 | | 48 | 58 | 80 | 128 | 181 | 217 |
| M16 | | 74 | 88 | 123 | 197 | 277 | 333 |
| M18 | | 103 | 121 | 172 | 275 | 386 | 463 |
| M20 | | 144 | 170 | 240 | 385 | 541 | 649 |
| M22 | | 194 | 230 | 324 | 518 | 728 | 874 |
| M24 | | 249 | 295 | 416 | 665 | 935 | 1120 |
| M27 | | 360 | 435 | 600 | 961 | 1350 | 1620 |
| M30 | | 492 | 590 | 819 | 1310 | 1840 | 2210 |
| M36 | | 855 | 1030 | 1420 | 2280 | 3210 | 3850 |
| M42 | | 1360 | | 2270 | 3640 | 5110 | 6140 |
| M45 | | 1690 | | 2820 | 4510 | 6340 | 7610 |
| M48 | | 2040 | | 3400 | 5450 | 7660 | 9190 |

1.7.2.3 – Porcas.

A definição sobre porcas encontrada na literatura é apresentada abaixo:

“Porcas podem ser consideradas como parafusos fêmeas constituindo a cabeça removível de um parafuso ou um prisioneiro”. (Fonte: Desenho Técnico Mecânico, volume 2: MANFÉ, POZZA, SCARATO).

Distinguem-se porcas prismáticas, cilíndricas e manobráveis a mão. As porcas, da mesma forma que os parafusos, seguem normas e complementam um sistema de fixação, dependendo do tipo de aplicação.

As porcas com roscas métricas ISO, também são as mais utilizadas na indústria, a seguir são citados alguns tipos de porcas:

- ✓ Porcas hexagonais;
- ✓ Porcas hexagonais com entalhe;
- ✓ Porcas hexagonais fechadas com calota esférica;
- ✓ Porcas quadradas;
- ✓ Porcas cilíndricas;
- ✓ Porcas tipo borboleta;
- ✓ Porcas serrilhadas;
- ✓ Porcas com alças (olhais).

1.7.3 – Tipos de Juntas.

1.7.3.1 – Introdução.

Um dos fatores que influencia na escolha do sistema de aperto é a criticidade da junta.

Obviamente, as juntas roscadas são as mais críticas por estarem relacionadas à segurança. A falha de uma destas juntas, freqüentemente referenciadas como juntas Classe A, podem resultar numa catástrofe ou lesão corporal. Exemplos são rodas, freios e caixas de direção hidráulica.

Intermediário, ou juntas Classe B, são relativas à confiabilidade. Falhas nestas juntas podem resultar deficiência de um equipamento. Exemplos são juntas parafusadas em motores e transmissões.

Juntas Classe C e D são relativas à satisfação do cliente. A falha em uma destas juntas pode causar um irritante rangido, vazamento ou barulho.

1.7.3.2 – Juntas Rígidas.

Conforme a norma ISO 5393, uma determinada junta é considerada rígida quando o torque final é alcançado após rotação de 30° a partir do ponto de encosto, ou seja, união das partes aparafusáveis. A Figura 1.11 mostra um exemplo de junta rígida e na Figura 1.12 o seu comportamento relacionando o torque e ângulo.

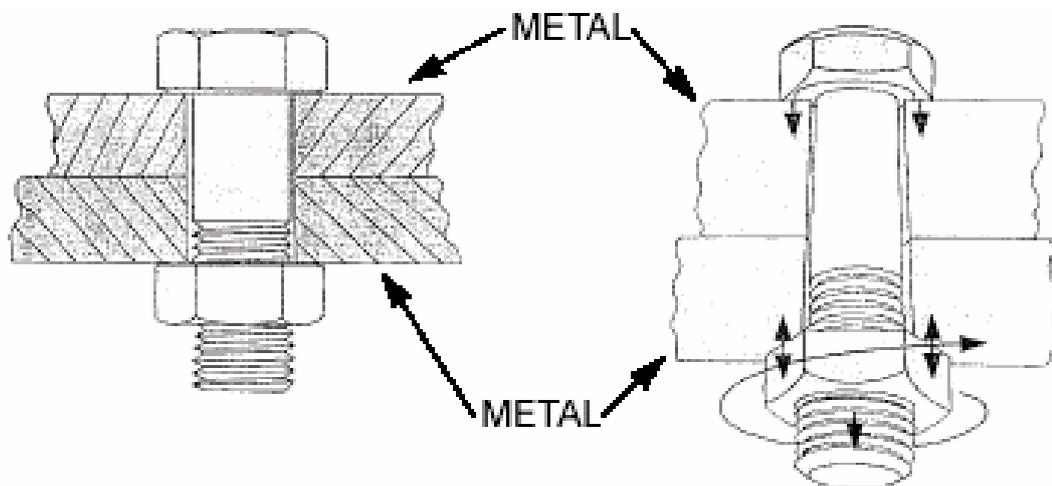


Figura 1.11 – Exemplo de junta rígida (cortesia M. Shimizu).

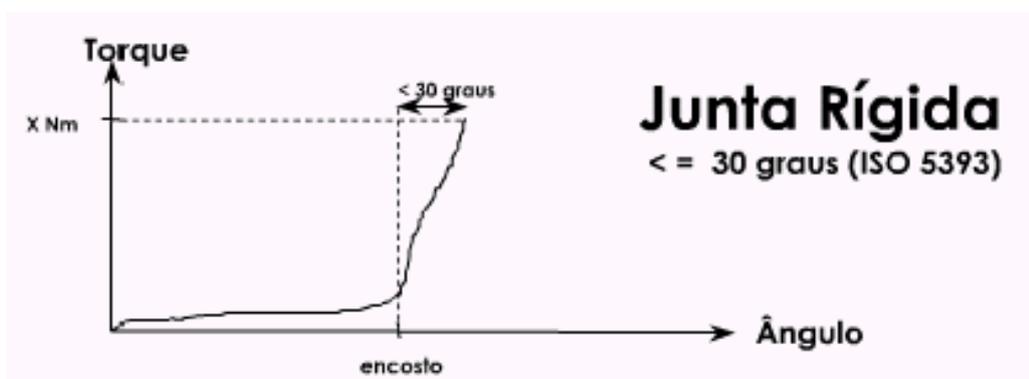


Figura 1.12 – Comportamento da junta rígida (cortesia ATLAS COPCO).

1.7.3.3 – Juntas Flexíveis.

Conforme a norma ISO 5393, uma junta flexível é aquela que na qual o torque final é alcançado após uma rotação mínima de 720° a partir do encosto. A Figura 1.13 mostra um exemplo de junta flexível e na Figura 1.14 o seu comportamento relacionando o torque e ângulo.

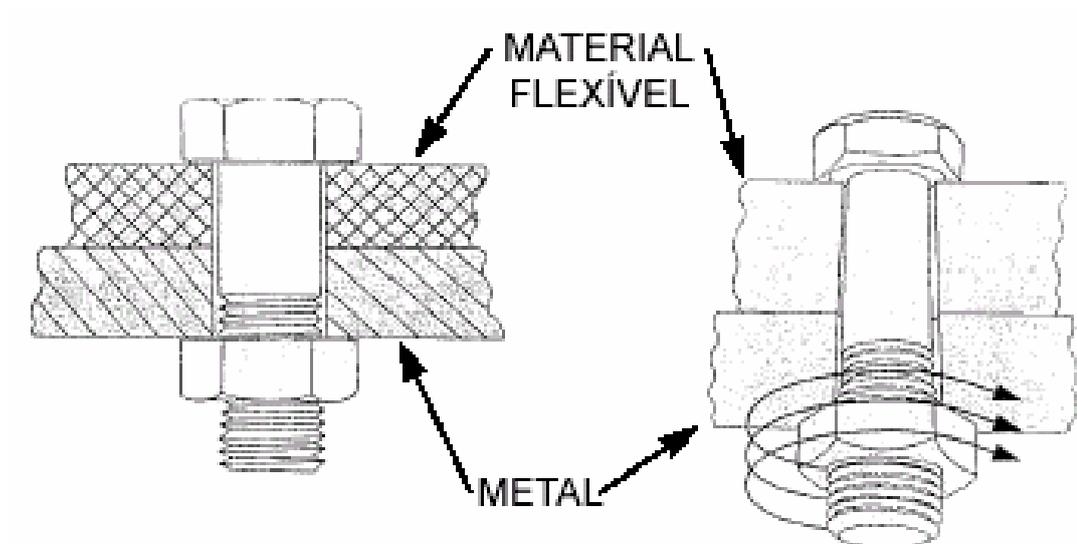


Figura 1.13 – Exemplo de junta flexível (cortesia M.Shimizu).

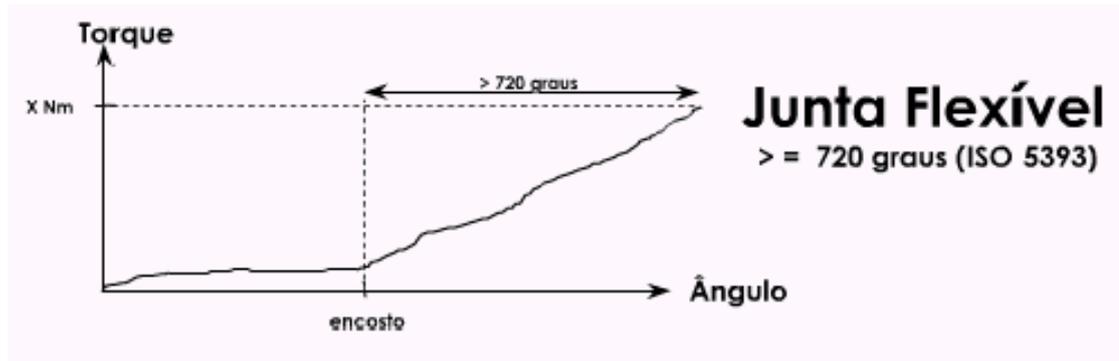


Figura 1.14 – Comportamento de uma junta flexível (cortesia ATLAS COPCO).

1.7.4 – Parâmetros Básicos de Controle de Aperto.

1.7.4.1 – Torque.

A norma ISO 5393 é um padrão internacional que especifica o método para teste de performance dos equipamentos rotativos em elementos roscados. Abaixo é mostrado a definição de torque fornecida pela norma.

“Torque é o produto da força de aperto e a distância perpendicular entre a linha da força e o centro do parafuso”. (ISO 5393, 1994). Equação 1.4.

Ou seja:

$$T = FxR \quad (1.4)$$

Onde:

T = Torque

F = Força aplicada

R = Distância entre a Força aplicada e o centro do parafuso.

Este conceito pode ser visualizado na Figura 1.15, onde é conclusivo que quanto maior a distância para a mesma força aplicada, maior será o torque produzido no eixo.

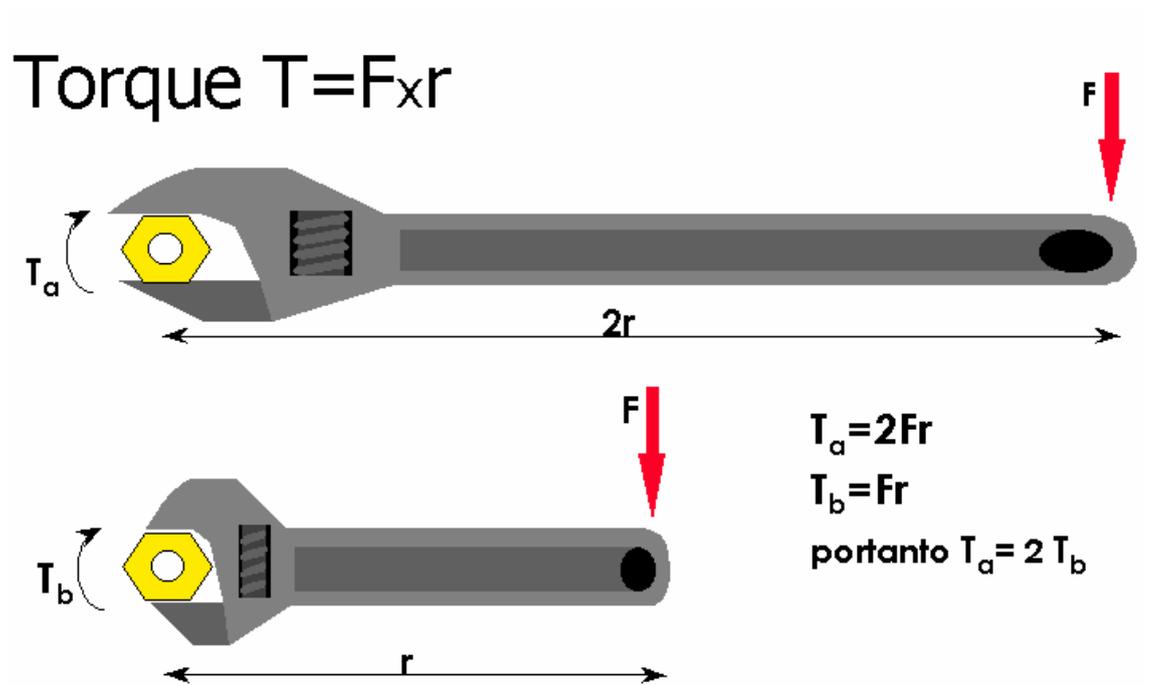


Figura 1.15 – Definição de torque (cortesia ATLAS COPCO).

A unidade de torque pelo Sistema Internacional (SI) é dada por:

Nm (Newton x metro)

Outras unidades podem ser utilizadas, como:

Kgf.m (Kilograma força x metro); Sistema Métrico

Lb.ft (Libras x pé quadrado); Sistema Americano

Lb.in (Libras x polegada); Sistema Americano

Pode-se utilizar para conversão destas unidades em Nm os seguintes valores (Dados Técnicos - TOHNICHI, 1999):

| | | |
|-----------------------------------|---|----------|
| 1 Kgf.m (Kilograma força x metro) | = | 9,81 Nm |
| 1 Lb.ft (Libras x pé quadrado) | = | 1,36 Nm |
| 1 Lb.in (Libras x polegada) | = | 0,113 Nm |

1.7.4.2 – Torque e Ângulo.

Definição de ângulo fornecida pela ISO 5393.

“Ângulo: Medição do deslocamento angular a partir do momento em que o parafuso é girado até o seu destino final” (ISO 5393, 1994).

A unidade é expressada em graus geométricos (°).

O torque de aperto é o critério normalmente usado para especificar a pré-tensão no parafuso. O torque, ou o momento da força, pode ser medido pelo método dinâmico, enquanto o parafuso é apertado, ou estático, verificando o torque com um torquímetro após o aperto.

Com o avanço da eletrônica e o desenvolvimento de novos materiais, as indústrias passaram a utilizar parafusos com dimensões menores, diante deste cenário, exigiu-se o desenvolvimento de uma técnica de aperto que envolve além do pré-torque também um ângulo de giro, elevando assim a força de união.

O controle de ângulo de giro baseia-se na relação que existe entre o alongamento (deformação linear) e o ângulo de giro da cabeça/porca do parafuso. Desta forma, as influências dos atritos ficam minimizadas, sendo somente relacionadas ao que se chama de “momento de ligação”.

As especificações de torque variam consideravelmente dependendo das demandas de qualidade da junta. Exemplo: uma junta de segurança em um veículo automotor, tal como a suspensão da roda, não pode falhar, por outro lado, uma simples fixação de uma porca com parafuso para ajuste de um dispositivo não é considerado importante do ponto de vista de força de união.

Portanto, o ângulo de giro do parafuso ou porca numa junção carregada será determinado em função da elasticidade do parafuso e da junta.

Quando a junta é apertada, o giro do parafuso ou porca cria uma força de tensão no parafuso F_s e uma força de união F_u nas peças unidas, conforme mostra a Figura 1.16. Devido as forças, o parafuso é alongado e as partes da junta são comprimidas.

A compressão da junta (δu) e o alongamento do parafuso (δs) podem ser unidos graficamente para uma forma triangular, gerando uma resultante final do alongamento que pode ser utilizada para determinar o ângulo de aperto.

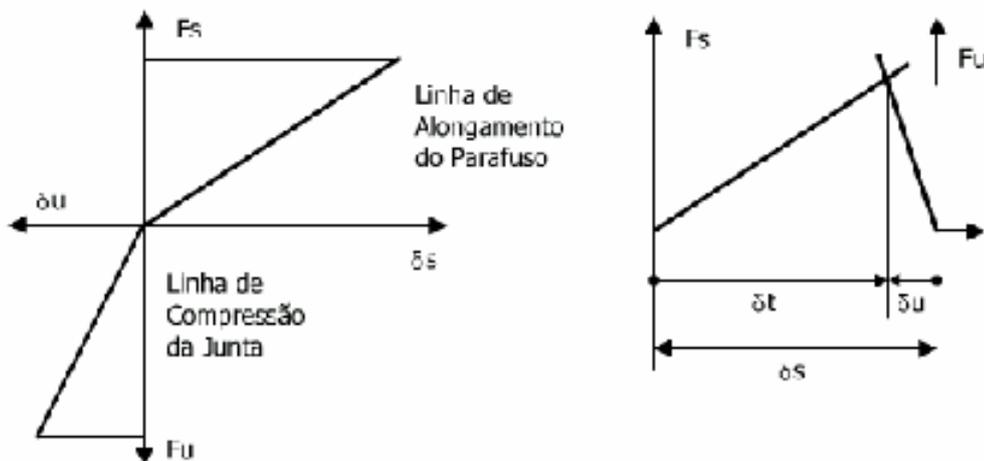


Figura 1.16 – Força de união função do alongamento (Cortesia M.Shimizu).

Uma junta apertada estará sempre sujeita a assentamento das superfícies durante a operação e uma deformação pode ocorrer na junta de vedação.

Conhecendo a elasticidade das juntas e do parafuso, bem como o tipo de cabeça adequada para aquela junta, obtém-se grande precisão no aperto em qualquer faixa de utilização do mesmo (plástica ou elástica).

Observando a Figura 1.17, nota-se que as vantagens do método são melhores na zona plástica do parafuso, devido ao achatamento da curva Torque x Ângulo, garantindo sempre a geração da força requerida. (Fonte: Manual Tecnologia de Fixação, M.SHIMIZU, 1996).

A desvantagem para parafusamento na zona plástica é a necessidade de um parafuso/porca especial, suficientemente dúctil e de grande alongamento, com reaproveitamento restrito. O ângulo é normalmente determinado em testes de laboratório.

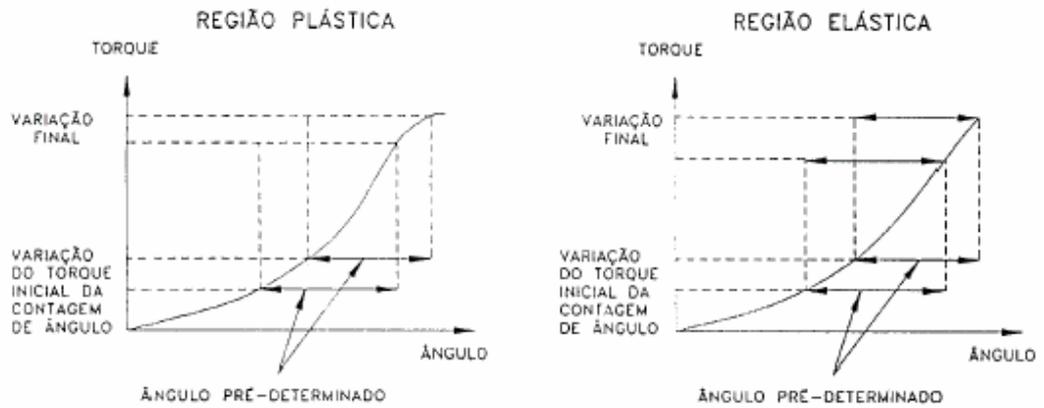


Figura 1.17 – Região plástica e elástica (Cortesia M.Shimizu).

Depois de um assentamento seguro, com torque suficiente para que as partes obtenham o momento de ligação, o parafuso é girado até um ângulo determinado, como mostrado na Figura 1.18.

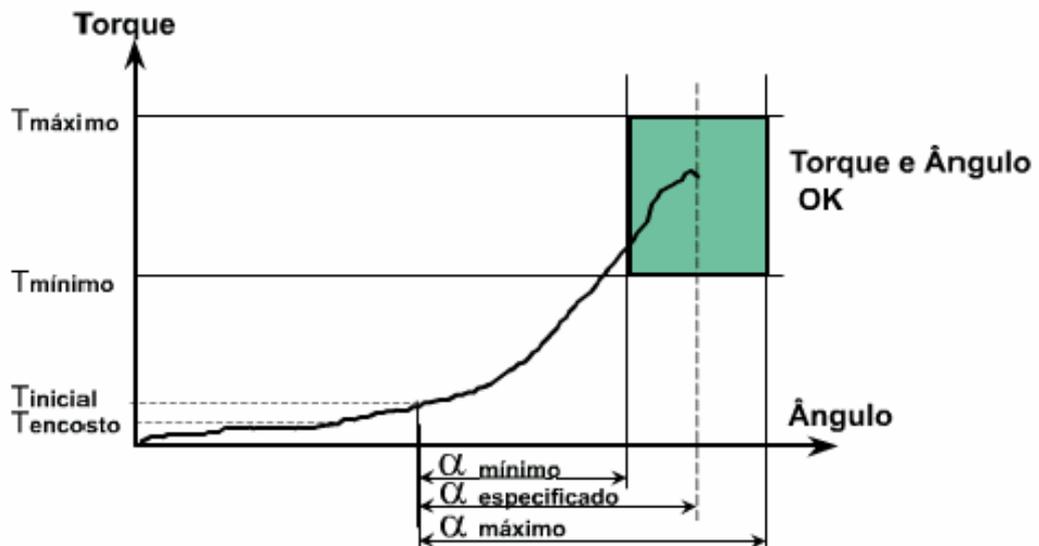


Figura 1.18 – Processo de aperto por torque e ângulo (cortesia ATLAS COPCO).

1.7.5 – Tipos de Equipamentos Utilizados em Fixações

1.7.5.1 – Chave Manual.

O aperto manual com chave é a forma mais primitiva criada pelo homem e ainda hoje é o método mais comumente utilizado nas oficinas mecânicas de reparo. A grande variedade de parafusos e aplicações torna difícil a introdução das mesmas ferramentas utilizadas no processo de produção. O aperto com chave manual permanecerá dominante nas oficinas de reparo e, neste método, a habilidade do mecânico é de grande importância para se obter o melhor resultado.

1.7.5.2 – Chaves de Impacto e Impulso.

As chaves de impacto e impulso são pneumáticas e atualmente são leves e muito produtivas. O seu funcionamento é composto por um sistema de batidas em intervalos de tempo sincronizados, onde através de um conjunto martelo/bigorna transmite-se pulsos de torque para a fixação. Com este sistema pode-se atingir torques altos e de reação intermediária para o operador. Entretanto as chaves de impacto e impulso têm gradativamente mudado dos processos de produção para as oficinas de reparo, devido às seguintes razões:

- a) O barulho, especialmente em algumas aplicações, é muito alto. Em um número cada vez maior de países, a legislação não permite o nível de ruído acima de 80 dBA, já em uma oficina de reparo, este nível de ruído é permitido, visto que o tempo de exposição é bem menor em relação ao processo de produção.
- b) A precisão não é muito exata em torno de 20 e 30% e é muito influenciada pela a habilidade do operador. Para processos de produção que exigem precisão no aperto, é necessário 100% do controle de torque estático com torquímetro manual.

1.7.5.3 – Apertadeiras.

A utilização de apertadeiras no método de fixação é executado com atrito dinâmico durante todo o processo. A verificação do torque deve ser feita utilizando-se um transdutor rotativo de torque, desta forma a precisão da ferramenta e do aperto pode ser julgada. Quando a verificação é feita posteriormente, existe uma mudança do coeficiente de atrito dinâmico para estático e mesmo o assentamento ocorre, o que pode alterar drasticamente o valor e variação de torque comparado com o torque dinâmico instalado. As seguintes ferramentas podem ser classificadas como apertadeira:

- a) Apertadeiras Angulares: Utilizando-se apertadeiras angulares, o operador pode suportar as forças de reação, quando ferramentas de embreagem são utilizadas. Para torques altos e juntas elásticas, pode-se utilizar braços de reação para evitar riscos ao operador e danos pessoais. A precisão deste equipamento está em torno de 10 a 15%.
- b) Apertadeiras Tipo Pistola: A apertadeira de pistola deve ter uma barra de reação para absorver o torque de reação. O torque que pode ser suportado pelas mãos é de apenas 4 a 5 Nm, acima deste é recomendado um suporte de punho.
- c) Apertadeiras com rosca sem fim: Este tipo de apertadeira é similar a apertadeira angular, porém há uma diferença importante, a rosca sem fim é auto-travante, o que significa que pode ser utilizada como chave manual. As chaves tipo catraca, também trabalham desta maneira.
- d) Apertadeiras Múltiplas: Os fusos dessas apertadeiras são projetados para múltiplo uso. O tipo de apertadeira múltipla mais simples é a “Stall”. Como um número de fixadores são apertados ao mesmo tempo, a reação de torque é absorvida com o esforço lateral nos fusos. No momento do projeto de um sistema de fixação utilizando apertadeiras múltiplas, este fator deve ser levado em consideração, para não danificar os mancais dos fusos.

- e) Apertadeira Tipo “Shut off”: Esta apertadeira faz parte do processo evolutivo do tipo “Stall”, sendo que por meio de um sistema de desligamento controlado esta máquina ao atingir o torque esperado sinaliza em esforço de reação ao operador. A precisão deste equipamento é em torno de 6 a 8%.

- f) Apertadeira hidro-pneumática: Esta apertadeira produz baixa reação ao operador, baixo nível de ruído e, como todas as apertadeiras pulsantes, não são aconselhadas para utilização em juntas flexíveis, pois pode-se atingir o ponto de desligamento da ferramenta sem que se tenha o valor exato ou bem próximo do objetivo pré-estipulado. A precisão desta ferramenta está em torno de 10 a 20%.

As apertadeiras utilizam um painel onde está o controlador (Servo), responsável pelas informações de torque, ângulo, velocidade e outras informações que serão necessárias para o funcionamento da apertadeira. Estes painéis possuem também saída de dados, porta de comunicação para computadores, saída para impressora, entrada e saída para ligação em rede dos painéis e conector para o cabo da máquina.

1.7.5.4 – Parafusadeira elétrica.

Este tipo de parafusadeira possui um sistema de desligamento através de embreagem e é utilizada para operações de baixo torque, no máximo 5 Nm. A sua alimentação pode ser através de bateria acoplada à parafusadeira ou através de alimentação 220 Volts com controlador de pontos, facilitando o manuseio em processos produtivos. A sua precisão está em torno de 8 a 9%.

1.7.6 – Calibração de Torque no Processo de Manufatura.

O método para calibração do torque é definido pelo padrão internacional (ISO 5393, 1994), onde essa norma reconhece que a medição dos valores de torque podem ser feitos durante o processo de aperto de uma determinada junta, o qual é chamado de torque dinâmico.

O processo de calibração do equipamento para verificação do valor de torque especificado, segue as seguintes etapas:

- a) Selecionar o transdutor de torque de acordo com a faixa de torque especificado.
- b) Acoplar o transdutor de torque entre a parafusadeira e a ponta de aperto utilizando o adaptador adequado para cada tipo de parafusadeira.
- c) Acoplar ao transdutor de torque o coletor de dados para leitura dos valores de torque.
- d) Acertar o fundo de escala do coletor de dados para ser compatível com o transdutor de torque.
- e) Inserir os limites de torque no coletor de dados considerando a especificação de engenharia definida para a operação.
- f) Realizar (10) dez apertos e anotar os valores de torque que aparecem no visor do coletor de dados. Tenha cuidado ao realizar o teste para não deixar o transdutor de torque inclinado em relação ao eixo da parafusadeira e a ferramenta. Também evite solavancos no transdutor de torque durante a medição, pois estas variáveis interferem na medição do torque.
- g) Verificar se o valor de desvio de leitura esta dentro do limite de $\pm 5\%$ do torque alvo, estando dentro dos limites o equipamento não necessita de calibração. Caso o desvio de leitura esteja fora do limite de $\pm 5\%$, ajustar o equipamento e realizar mais (10) apertos anotando os valores de torque conforme descrito na etapa "f".
- h) Realizar as etapas "f" e "g" até que o desvio de leitura fique dentro do limite de $\pm 5\%$ do torque alvo.

1.8. Conceitos de Estatística

Estatística é a parte da matemática em que se investigam os processos de obtenção, organização e análise de dados sobre uma população ou sobre uma coleção de seres quaisquer, e os métodos de tirar conclusões e fazer previsões com base em dados amostrais (BRANDÃO, 1997). A palavra Estatística vem de “Status” – (*Estado* em Latim).

Há 3000 anos A.C. já se faziam censos na Babilônia, China e Egito, no livro Números da Bíblia, fala sobre Moisés fazer um levantamento dos Homens de Israel que estivessem aptos a guerrear.

No século XVII foi usado nas tábuas de mortalidade, que até hoje são usadas pelas companhias de seguros.

A estatística é aplicada em diversas áreas, como a medicina, agricultura, economia e finanças, serviços, indústrias bélicas e aeroespacial, seguradoras, comércios, processos de manufatura, etc...

Dentre as técnicas mais utilizadas em estatística, pode-se citar: Histogramas, Cartas de controle estatístico do processo (CEP), Diagrama de Pareto, Diagrama de Dispersão, Cartas de tendência, capacidade do processo (CP,CPK) e percentagem.

Para apresentar os resultados deste trabalho, serão utilizadas as técnicas de histograma e capacidade do processo, tendo a seguir uma revisão mais detalhada. (Fonte: Apostila de Conceitos Estatísticos, Visteon Sistemas Automotivos, 1997).

1.8.1 – Definição de Histograma

Histograma é um gráfico de barras que envolve a medição de dados e mostra a sua distribuição. O histograma também apresenta quanto de variação existe em qualquer processo.

Repare que as técnicas estatísticas visam resumir e organizar informações provindas de um conjunto de dados. A utilização dessas técnicas permite estudar um fenômeno sem considerar os números individualmente e desta forma possibilita análises coerentes e decisões seguras.

Uma forma muito utilizada de resumir um conjunto de dados é através da classificação das observações em intervalos de classes, também chamada distribuição de frequências.

Os principais estágios na construção de uma distribuição de frequências são:

- ✓ Estabelecer as classes ou intervalos de grupamento dos dados;
- ✓ Enquadrar os dados nas classes;
- ✓ Contar o número de observações em cada classe;
- ✓ Apresentar os resultados numa tabela como abaixo.

Tabela 1.6 - Distribuição de frequências do diâmetro interno de uma haste, em mm.

| Classes | Frequência | % |
|--------------------|-------------------|-----------|
| 3.85 - 4.35 | 2 | 4 |
| 4.35 - 4.85 | 7 | 14 |
| 4.85 - 5.35 | 15 | 30 |
| 5.35 - 5.85 | 14 | 28 |
| 5.85 - 6.35 | 6 | 12 |
| 6.35 - 6.85 | 5 | 10 |
| 6.85 - 7.35 | 1 | 2 |

Observe que a partir da Tabela 1.6 de distribuição de frequências é possível construir um gráfico como mostra a Figura 1.19, o qual chama-se histograma.

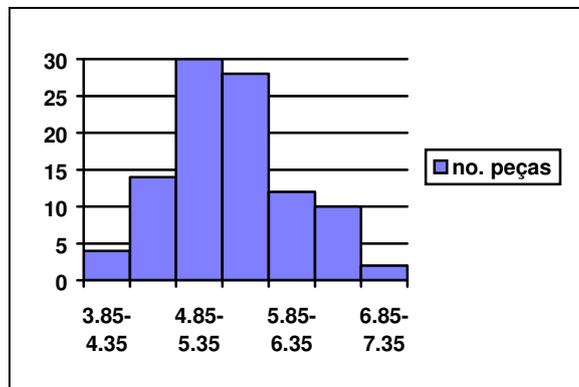


Figura 1.19 – Histograma.

Muitos fenômenos apresentam histograma semelhante ao caso acima apresentado, diferindo apenas na média e no desvio-padrão (variabilidade das observações), ou seja, a medida central e a dispersão podem ser diferentes, preservando entretanto, a forma padrão.

Karl F. Gauss (1777 - 1855) constatou que essa distribuição poderia ser aproximada por uma função matemática representada na Figura 1.20, que lembra a forma de um sino:

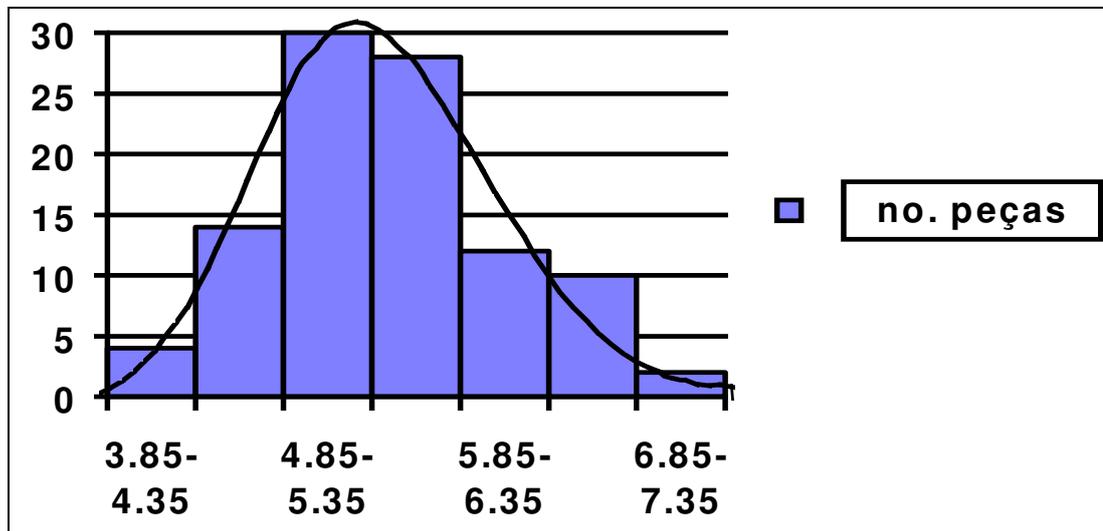


Figura 1.20 – Curva de gauss

Por isso, deu-se o nome de “distribuição Gaussiana” ou distribuição Normal. Repare que a distribuição matemática constitui uma boa aproximação dos dados reais e que a probabilidade de alguma observação estar próxima à média (na parte central da distribuição) é alta. Por outro lado, observações próximas à cauda são menos prováveis e portanto não esperadas.

A partir da caracterização da distribuição normal teórica (média μ e desvio-padrão σ) é possível prever a quantidade de observações que estarão em um certo intervalo (a,b), pois está diretamente relacionado com a probabilidade associada a esse intervalo, ou seja, a área hachurada do gráfico, mostrado na Figura 1.21.

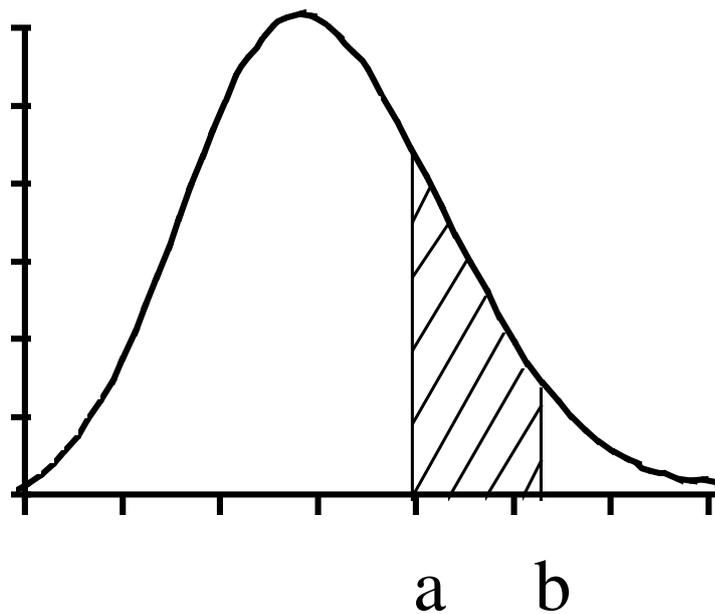


Figura 1.21 – Intervalo (a,b)

É importante ressaltar que a “distribuição Gaussiana” é muito utilizada e a compreensão das suas características é importante. Entretanto, também existem muitas distribuições de dados que não se aproximam da Gaussiana e portanto devem ser estudadas de forma diferente. Um teste de aderência verifica se os dados provêm de uma distribuição normal, mas apenas a análise do histograma já denuncia este desvio, como mostrado nas Figura 1.22, 1.23 e 1.24.

Verifique alguns casos clássicos:

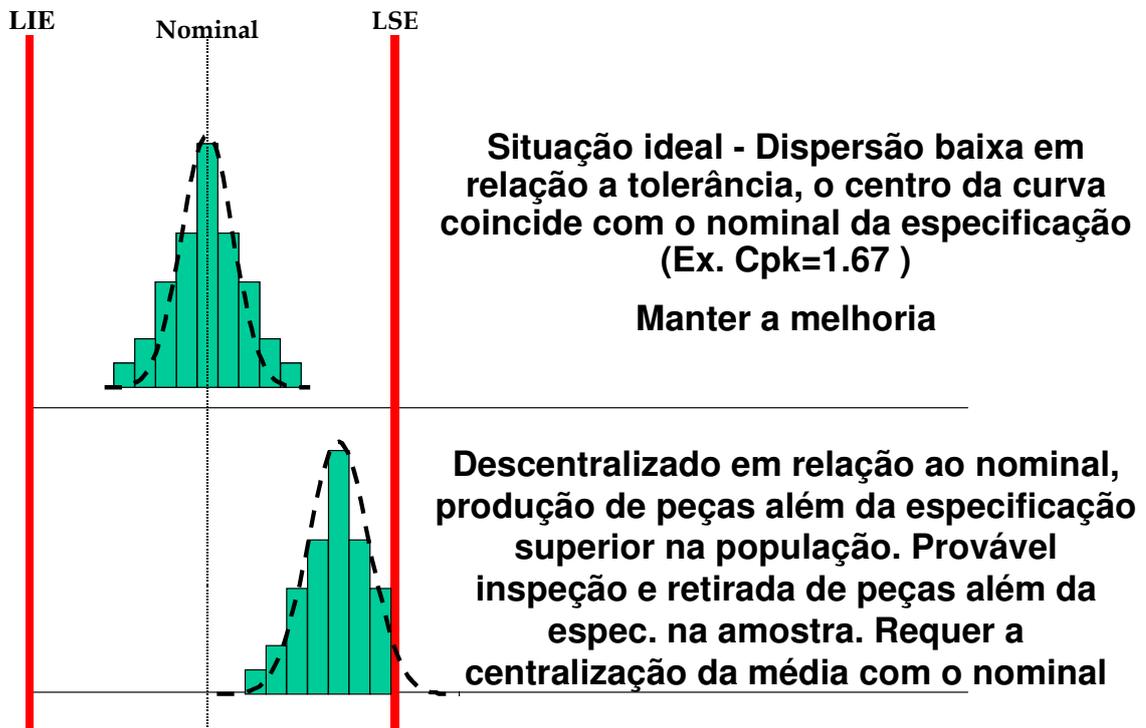


Figura 1.22 – Interpretação de histograma 1 (cortesia VISTEON).

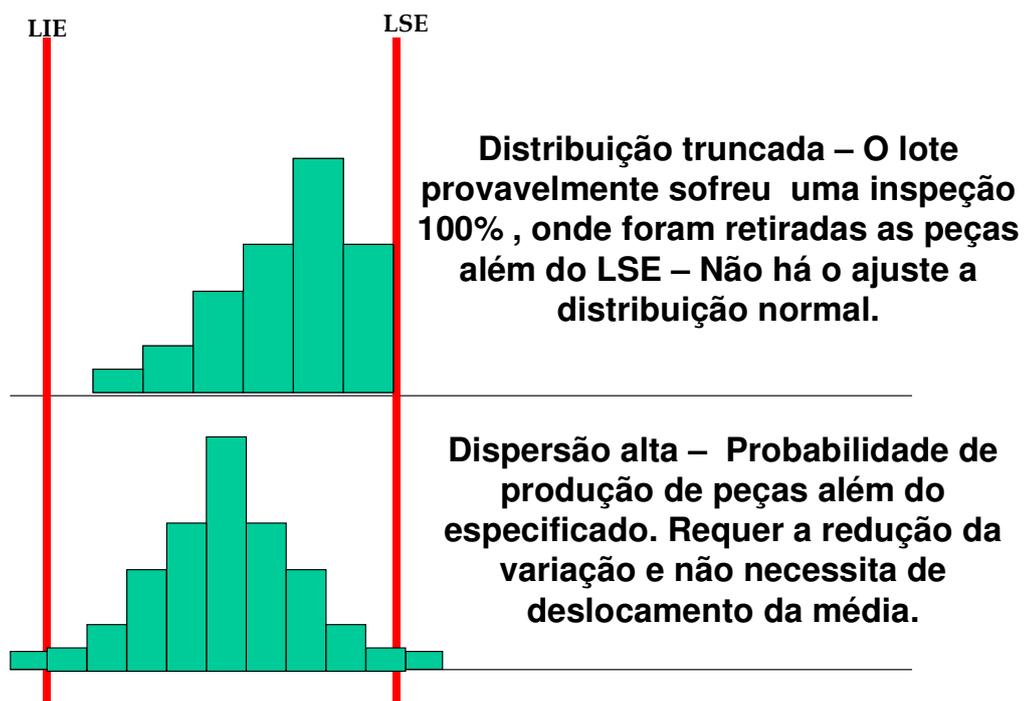


Figura 1.23 – Interpretação de histograma 2 (cortesia VISTEON).

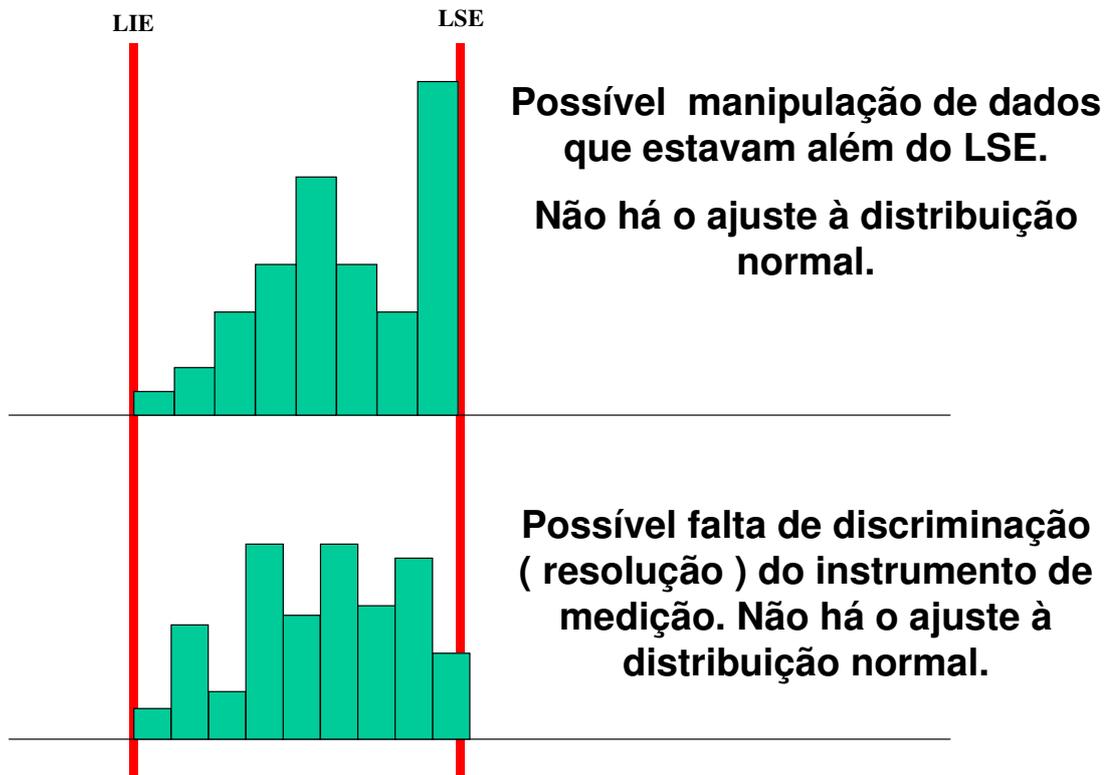


Figura 1.24 – Interpretação de histograma 3 (Cortesia VISTEON).

1.8.2 – Definição de Capacidade de Processo.

O Controle Estatístico de Processos tem a finalidade de observar o comportamento de um processo qualquer de forma científica. Desta forma, as análises e reações são padronizadas eliminando então a intervenção no processo baseada em conclusões pessoais.

A ferramenta criada pelos estatísticos para essa análise é o gráfico de controle, que utiliza a teoria da distribuição normal para definir os limites de controle, ou seja, a região sob a qual se espera encontrar as observações de interesse. Veja o gráfico na Figura 1.25:

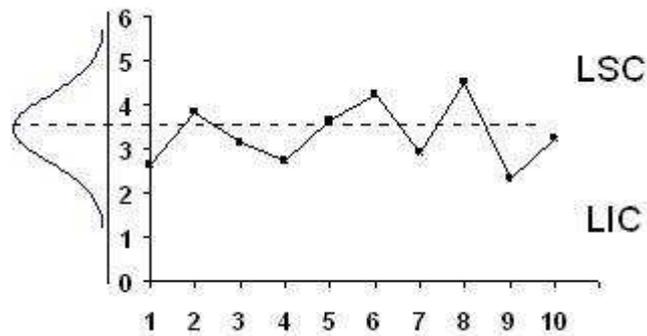


Figura 1.25 – Gráfico de controle (cortesia VISTEON).

Observe acima que o gráfico de controle está baseado na teoria da distribuição Gaussiana, pois caracterizando a curva normal como feito acima é possível definir os limites de controle. Repare que um ponto fora dos limites de controle é muito pouco provável, já que a distribuição teórica associada ao gráfico (representação a esquerda da figura acima) mostra não haver pontos com esta condição. Portanto, pode-se atribuir uma causa especial a um ponto fora dos limites de controle ou a padrões não-aleatórios e, nestes casos, ações corretivas devem ser tomadas com a finalidade de tornar o processo estável novamente.

1.8.2.1 – Análise de Capacidade.

Os índices de capacidade (principalmente C_p e C_{pk}) foram criados para auxiliar os não-estatísticos a analisar eficientemente a proporção de itens produzidos fora das especificações, uma vez que o processo tenha adquirido estabilidade. Para isto, é necessário parametrizar a distribuição observada (média e desvio padrão) e calcular a proporção de itens produzidos fora do intervalo de controle especificado. Observe Figura 1.26 abaixo:

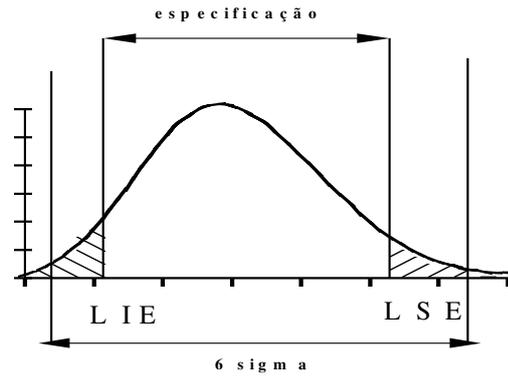


Figura 1.26 – Itens produzidos fora da especificação (cortesia VISTEON).

O processo acima produziu alguns itens fora das especificações como pode ser observado pela área hachurada e é importante perceber que se o processo é estável, esse comportamento se manterá inalterado se nenhuma ação corretiva for tomada.

1.8.2.2 – Índices de Capacidade.

O C_p é um índice de 1ª geração usado para analisar se um processo é capaz. Este parâmetro medirá se a variação natural do processo (6σ) é maior que o intervalo especificado pela engenharia. Portanto, sempre que o C_p for maior que a unidade, significa que $6\sigma < (\text{intervalo especificado})$ e então conclui-se que o processo é capaz. Equação 1.5.

$$C_p = \frac{ES - EI}{6\sigma} \quad (1.5)$$

onde:

C_p = Capacidade do processo

ES : Especificação Superior

EI : Especificação Inferior

σ : Desvio padrão do processo

Entretanto, o Cpk também deve ser considerado na análise de capacidade, pois não adianta a variação natural do processo (6σ) ser menor que o intervalo especificado se essa distribuição não estiver centrada como mostrado no gráfico abaixo, Figura 1.27:

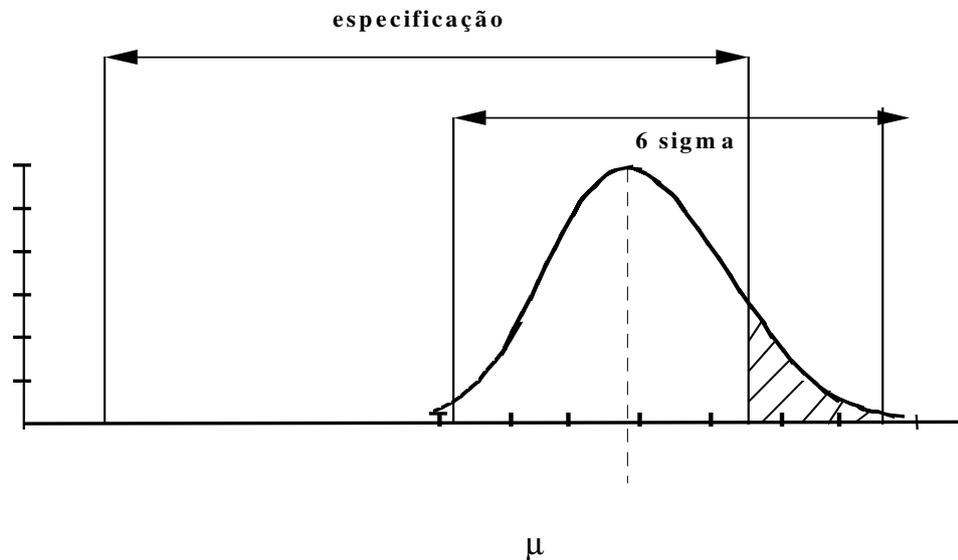


Figura 1.27 – Processo descentralizado (cortesia VISTEON).

Portanto o Cpk mede se o processo está centrado ou não em relação às especificações. No caso acima, esse índice será menor que a unidade, já que o processo não está centrado e podemos observar rejeições que estão representadas pela área hachurada. O Cpk é calculado pela equação 1.6.

$$C_{pk} = \text{Min}\left(\frac{\mu - EI}{3\sigma}, \frac{ES - \mu}{3\sigma}\right) \quad (1.6)$$

onde :

Cpk = Capabilidade do processo

EI = Especificação Inferior

ES = Especificação Superior

μ = Média dos pontos

σ = Desvio padrão do processo

Então sempre que C_p e C_{pk} forem maiores que a unidade o processo será capaz. Um processo é considerado capaz em 4σ quando $C_{pk} > 1,67$.

Na Tabela 1.7, pode-se correlacionar o conceito dos índices de C_p e C_{pk} e avaliar o seu resultado.

Tabela 1.7 – Correlação entre os conceitos de C_p e C_{pk} .

Conceito C_p e C_{pk}

| | | C_p | |
|----------|------|--|--|
| | | RUIM | BOM |
| C_{pk} | RUIM | Processo não capaz. Trocar a ferramenta ou ajustar para obter boa precisão. | Processo capaz, mas a média precisa ser ajustada |
| | BOM | Não é possível !!! | Processo capaz e bem ajustado. |

Atualmente, com o avanço da informática, é fácil e rápido efetuar estes cálculos e analisar os seus resultados, utilizando softwares matemáticos como o MINITab, Matlab, Silab, entre outros.

Capítulo 2 – Proposição

A exigência da qualidade de um produto dentro do mercado comercial é muito grande. Atualmente com sistemas de qualidade cada vez mais abrangentes, exigem que o produto fabricado tenha controles de qualidade mais rigorosos nos processos de manufatura, garantindo a segurança, confiabilidade e satisfação do cliente final, neste caso, o consumidor.

Quando se trata em fabricar um veículo automotor, essas normas e exigências são ainda maiores. Imagine o cliente, comprando um carro “zero”, saindo da concessionária e na primeira esquina o parafuso da suspensão cair e um acidente ocorrer, pode-se imaginar as conseqüências...

Portanto, quando o assunto é junção de componentes, a complexidade é grande, pois devido a vasta gama de materiais disponíveis no mercado, faz com que o processo de fabricação seja bem estruturado para absorver todas as variações iminentes nos materiais.

Na técnica de junção de materiais por parafusamento o operador através de um equipamento, seja ele uma chave manual, um torquímetro ou uma parafusadeira, efetua a união de dois ou mais materiais utilizando elementos normalizados, como parafusos e porcas.

Alguns fatores devem ser levados em consideração quando a técnica de parafusamento é utilizada, fatores como:

1. Mão-de-obra: erro do operador, uso impróprio da ferramenta, montagem errada, erro de projeto.
2. Método: especificação de aperto incorreta, erro no procedimento de montagem, equipamento inadequado.
3. Máquina: falha mecânica, inexatidão, equipamento inadequado.
4. Material: material incorreto, fora de especificação, defeito no material, lubrificação insuficiente, resistência insuficiente do parafuso, falha de processo do parafuso.

Essas falhas geram na junção dos componentes defeitos como: falha na junta, perda do elemento (parafuso, porca), alinhamento incorreto, vazamento, ruído, desgaste e funcionamento defeituoso.

Dada a complexidade em definir o melhor sistema de aperto para uma condição desejada, considerando os fatores (custo / benefício) x (qualidade / segurança), o engenheiro necessita realizar vários testes e cálculos o que demanda tempo e dedicação.

Realizar cálculos e testes laboratoriais faz parte da atribuição do engenheiro, porém nem todos possuem agilidade e experiência para resolver estes problemas rapidamente o que torna lento o projeto e definição de um processo de montagem.

Considerando a grande competitividade no mercado os fatores tempo e custo, passam a ser grandes “inibidores”, pois uma decisão errada pode levar um plano ou negócio à falhar e, conseqüentemente causar sérios prejuízos a empresa, inviabilizando a fabricação do produto.

Atualmente existe uma grande rotatividade de mão-de-obra especializada dentro da indústria e na maioria dos casos, engenheiros mais experientes mudam de função ou empresa e levam consigo a experiência adquirida. Muitas empresas hoje são deficientes em seus controles por não se adequarem as normas ISO 9000 e acabam passando dificuldades por perderem seus funcionários e não terem históricos arquivados sobre os trabalhos e experiências passadas e isto gera um alto custo na tentativa de recuperar esses dados.

Baseado na dificuldade para definir o melhor sistema no processo de montagem através de parafusamento e, considerando os fatores tempo, custo, benefício e confiabilidade, é que se inicia o propósito deste trabalho, que consiste em: realizar pesquisas nos processos de manufatura dentro da indústria automobilística e utilizar o conhecimento dos engenheiros que atuam nesses processos para coleta de dados com base nas operações existentes, realizar pesquisas laboratoriais para avaliar o comportamento dos equipamentos para uma condição de junta pré-estabelecida, pesquisar em normas e documentos técnicos os parâmetros recomendados para operações com parafusamento e com o auxílio da inteligência artificial desenvolver um sistema inteligente baseado em conhecimento formando um banco de dados automatizado onde o usuário, no caso, o engenheiro ou projetista de um sistema de aperto possa consultar e tomar decisões rápidas com base em dados reais e confiáveis.

Capítulo 3 – Material e Método

Com o objetivo de estruturar a coleta de dados para análise dos resultados, foi definido os materiais, equipamentos e método para realização dos experimentos, conforme mostrado nos itens abaixo:

3.1 – Lista de Material.

A coleta de dados foi realizada através da utilização dos materiais descritos na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Lista de Materiais

| Equipamento | Característica |
|---|--|
| Parafusadeira Eletrônica com painel de controle. | Faixa de 0 a 20 Nm |
| Parafusadeira Pneumática | Faixa de torque de 0 a 20 Nm |
| Parafusadeira Elétrica | Faixa de torque de 0 a 4,5 Nm |
| Torquímetro Analógico | Valor máximo de leitura = 30 Nm Resolução = 0,5 Nm |
| Parafusos cabeça sextavada com flange | M6 x 1.0 x 19 mm, Classe 8.8. |
| Parafusos cabeça cilíndrica com entalhado interno | M4 x 1.0 x 10 mm, Classe 8.8 |
| Base de alumínio | 143 x 87 x 25 mm |
| “Socket” apex | MB-8mm |
| “Bits” apex | 49-B TX-15W |
| Transdutor de torque | Modelo: 038237-00201 Range: 2,26 a 22,6 Nm |
| Coletor de dados | Modelo: GSE 020290 |
| Bancada de testes | Morsa e armário de ferramentas, medindo 1200 x 900 x 700 mm. |
| Software matemático | MINITAB release 13.30. |
| Planilha para registro dos dados | Projetada em Microsoft EXCEL. |
| Ferramenta computacional | Expert SINTA, versão 1.1.2.8, 1998. |
| Notebook | Pentium III com 64 Mb de memória RAM. |
| Alimentação elétrica | 110 / 220 Volts |
| Alimentação pneumática | Pressão: 06 Bar. |

3.2. Método

O método utilizado para realização do trabalho foi dividido em três etapas, sendo: a primeira etapa, a avaliação do comportamento do equipamento para uma condição de aperto definida; segunda etapa, pesquisas nos processos de manufatura e literatura para coleta de dados; terceira etapa, programação do sistema "SEVAT" a partir os dados coletados.

3.2.1. Avaliação do comportamento do equipamento.

Utilizando os equipamentos parafusadeiras eletrônica, elétrica e pneumática com um transdutor de torque acoplado ao equipamento, efetuou-se medições com o auxílio de um coletor de dados acoplado ao transdutor de torque e realizando o parafusamento dos parafusos no bloco de alumínio fixado sobre a bancada de teste, os dados foram coletados, anotando-se os valores de torque lido. A Figura 3.1, mostra um diagrama de blocos em malha fechada para o processo com parafusadeira eletrônica e um diagrama de blocos em malha aberta para o processo com parafusadeira pneumática/ elétrica.

A coleta dos valores de torque do equipamento torquímetro analógico foi realizada em laboratório utilizando o mesmo material, porém a medição do valor é feita manualmente através da leitura no visor do equipamento.

A Figura 3.2 apresenta as fotos dos testes laboratoriais onde os valores de torque correspondente a cada equipamento foram coletados para avaliação do resultado.

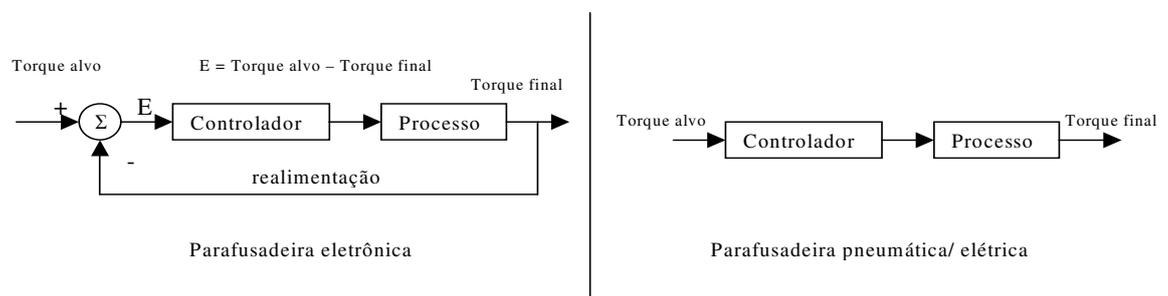


Figura 3.1 – Malha aberta e fechada.



Parafusadeira Eletrônica

Parafusadeira Elétrica

Parafusadeira Pneumática

Figura 3.2 – Fotos dos testes laboratoriais para coleta dos valores de torque.

3.2.2. Pesquisas nos processos de manufatura.

A coleta de dados nos processos de manufatura foi realizado através de entrevistas com os engenheiros responsáveis de cada processo e também com visitas nas células de montagem. Com o auxílio da equipe de manutenção foi possível consultar manuais de equipamentos, bem como os registros de qualidade dos produtos, registros esses que constam os parâmetros de aperto para cada tipo de condição de junta especificada.

Com uma planilha projetada utilizando-se o microsoft excel – Tabela 3.2, os parâmetros foram ordenados de forma a auxiliar as pesquisas nos processos de manufatura e também nas literaturas existentes dentro da indústria. Os dados coletados foram : Especificação do parafuso, classe do parafuso, tipo de junta, tipo de material, lubrificação, tipo de controle, equipamentos e parâmetros de aperto.

Tabela 3.2 – Coleta de dados nos processos de manufatura.

| Operações | Especificação do Parafuso | Classe do parafuso | Lubrificação | Tipo de Junta | Material | Tipo de Controle | Equipamento | Parâmetros |
|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------|--------------|---------------|-------------------|------------------|-----------------|---|
| Fixação Disk Hub | M6 x 1.0 x 19 sextavado c/ flange | 10.9 | não | rígida | Aço / Aço | Torque | Par. Eletrônica | T _{mín.} =11 Nm ; T _{máx.} = 14 Nm |
| Fixação Block Manifold | M8 x 1,25 x 35 sextavado c flange | 10.9 | não | rígida | Alumínio/Plástico | Torque | Par. Pneumática | T _{mín.} =17,5 Nm ; T _{máx.} = 23 Nm |
| AFCA - ABV | M6 x 1.0 x 20 sextavado c/ flange | 8.8 | não | rígida | Alumínio/Latão | Torque/ângulo | Par. Eletrônica | T _{mín.} =8,3 Nm ; T _{máx.} = 11,3 Nm ; 720° |
| AFCA - Tmap | High low 6mm | NA | não | rígida | Plástico/Plástico | Torque | Par. Eletrônica | T _{mín.} = 2.4 Nm ; T _{máx.} = 3.4 Nm |
| AFCA - T.Body | High low 6mm | NA | não | rígida | Alumínio/Plástico | Torque/ângulo | Par. Eletrônica | T _{mín.} = 5.3 Nm ; T _{máx.} = 6.3 Nm ; 720° |
| AFCA - Fuel Rail | M6 x 1.0 x 20 sextavado c/ flange | 8.8 | não | rígida | Aço/Latão | Torque | Par. Eletrônica | T _{mín.} =8,3 Nm ; T _{máx.} = 11,3 Nm |
| SCM - Duto Alumínio | M8 x 1,25 x 30 sextavado c flange | 8.8 | não | rígida | Alumínio/Alumínio | Torque | Par. Eletrônica | T _{mín.} =17 Nm ; T _{máx.} = 23 Nm |
| SCM - Bracket | M8 x 1,25 x 40 sextavado c flange | 8.8 | não | rígida | Alumínio/Alumínio | Torque | Par. Eletrônica | T _{mín.} =17 Nm ; T _{máx.} = 23 Nm |
| SCM - Duto Plástico | M6 x 1.0 x 25 sextavado c/ flange | 8.8 | não | rígida | Alumínio/Aço | Torque | Par. Eletrônica | T _{mín.} =11 Nm ; T _{máx.} = 13 Nm |
| Fixação do Cover - B.cumbustível | Tribolar | 2 | não | rígida | Aço / Aço | Torque | Par. Eletrônica | T _{mín.} = 3 Nm ; T _{máx.} = 6 Nm |
| Fixação do chicote - compressor | M5 x 0.8 x 10 sextavado | 8.8 | não | rígida | Alumínio/Aço | Torque | Par. Elétrica | T _{mín.} = 1,5 Nm ; T _{máx.} = 3,9 Nm |
| Fixação da Borboleta - T.Body | M4 x 0.8 x 11 Torx | NA | não | rígida | Aço/Aço | Torque | Par. Eletrônica | T _{mín.} = 1,3 Nm ; T _{máx.} = 2,1 Nm |
| Fixação do Bracket do T. Body | M6 x 1.0 x 10 cabeça redonda Torx | NA | não | rígida | Alumínio/Aço | Torque/ângulo | Par. Eletrônica | T _{mín.} = 8,3 Nm ; T _{máx.} = 10,3 Nm ; 720° |
| | High low 6mm | NA | não | rígida | Plástico/Plástico | Torque | Par. Elétrica | T _{mín.} = 3,5 Nm ; T _{máx.} = 4,5 Nm |

3.2.3. Programação do Sistema Especialista – SEVAT.

Através de uma ferramenta computacional, “Shell”, com ambiente de programação em, “Delphi”, o sistema especialista denominado de “SEVAT” (Sistema Especialista para Valores de Torque), foi estruturado utilizando os dados de valores de torque coletados nos processos de manufatura e nas literaturas existentes dentro da indústria, considerando também os testes realizados em laboratório para especificação do tipo de equipamento adequado para cada condição de junta desejada. A arquitetura do sistema foi baseado na Figura 1.5 – Arquitetura do Sistema Baseado em Conhecimento.

O projeto do sistema seguiu uma seqüência lógica de programação, esta seqüência é descrita em detalhes, a seguir:

a) Informações gerais sobre a base de dados.

Nessa tela inicial é feito o cadastro do nome do sistema, o nome do autor e as informações sobre a base de dados. Através das informações contidas nessa tela, o usuário do sistema analisa e decide se prossegue ou não na base de dados. A Figura 3.3, mostra a tela de cadastro das informações do sistema inteligente.

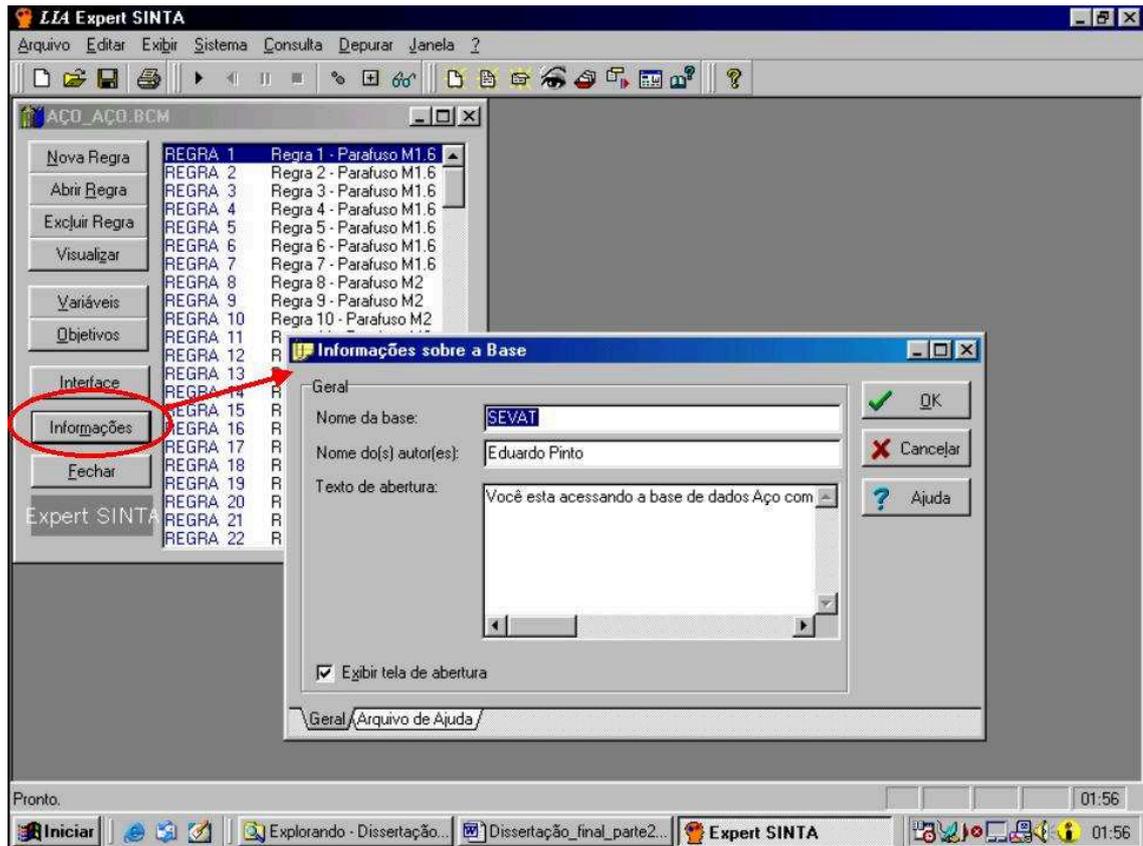


Figura 3.3 – Informações sobre a base de dados

b) Cadastro das variáveis e valores.

Nessa tela são inseridas as variáveis do sistema e os valores específicos para cada variável. Uma variável pode ser definida utilizando as seguintes condições:

Variáveis univaloradas: podem ter apenas uma instanciação. A máquina de inferência irá procurar a resposta até encontrar um valor ou até esgotar todas as possibilidades da base de conhecimento.

Variáveis multivaloradas: podem ter múltiplas instanciações. A busca dos valores para este tipo de variável prossegue até que toda a base de conhecimento seja explorada. Os valores permanecem acumulados.

Variáveis numéricas: são tratadas como univaloradas sempre.

Na Figura 3.4 é mostrado a tela de cadastro das variáveis e valores do sistema inteligente.

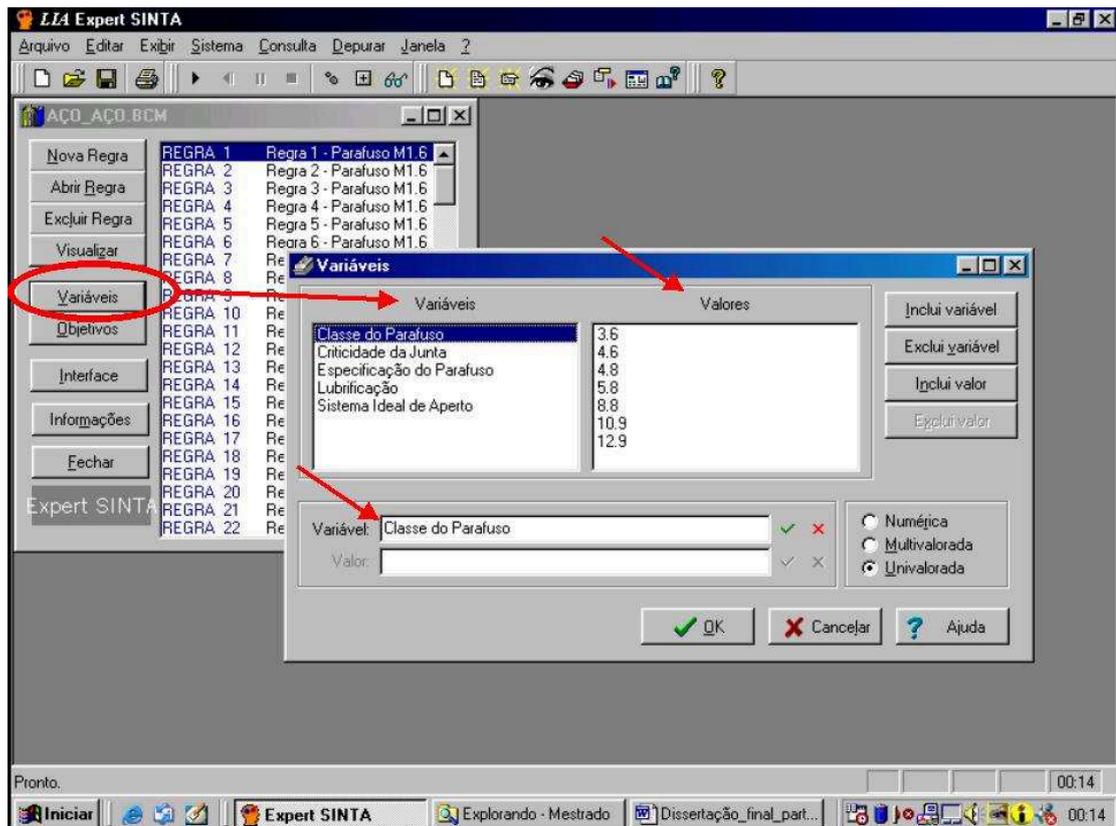


Figura 3.4 – Cadastro das variáveis e valores

As variáveis cadastradas referente ao sistema especialistas, "SEVAT", foram:

- Classe do Parafuso;
- Críticidade da Junta;
- Lubrificação;
- Sistema de Aperto Ideal.

Todas essas variáveis foram classificadas como univaloradas.

c) Definição da variável objetivo.

Com as variáveis cadastradas na base de dados é definida a variável objetivo.

Essa variável será apresentada como resultado da consulta feita pelo usuário e nesta estarão contidos os dados relativos aos valores escolhidos pelo usuário no momento da consulta. Esses dados servirão de base para tomada de decisão. Na Figura 3.5 é apresentada a tela de definição da variável objetivo e onde também é estabelecido essa variável como representação do resultado.

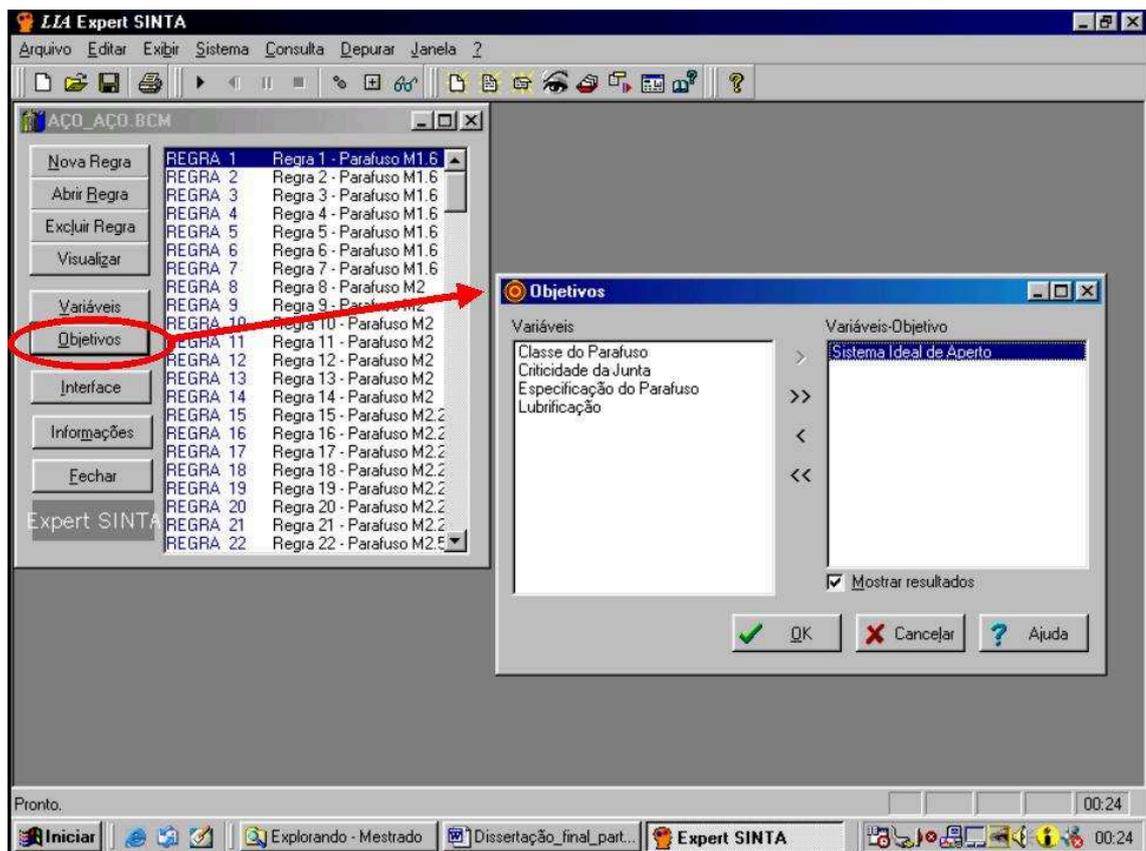


Figura 3.5 – Definição da variável objetivo.

d) Criação da interface com o usuário.

Nessa fase é definido a pergunta para cada variável cadastrada na base de dados, menos para a variável objetivo. O principal motivo dessas perguntas é facilitar ao usuário o entendimento e a navegação no sistema especialista, “SEVAT”, tornando a consulta rápida e fácil. Na Figura 3.6 é mostrada a tela de cadastro das perguntas, e também para auxiliar o usuário do sistema é possível descrever explicações sobre a pergunta elaborada no espaço “Motivo/Ajuda”.

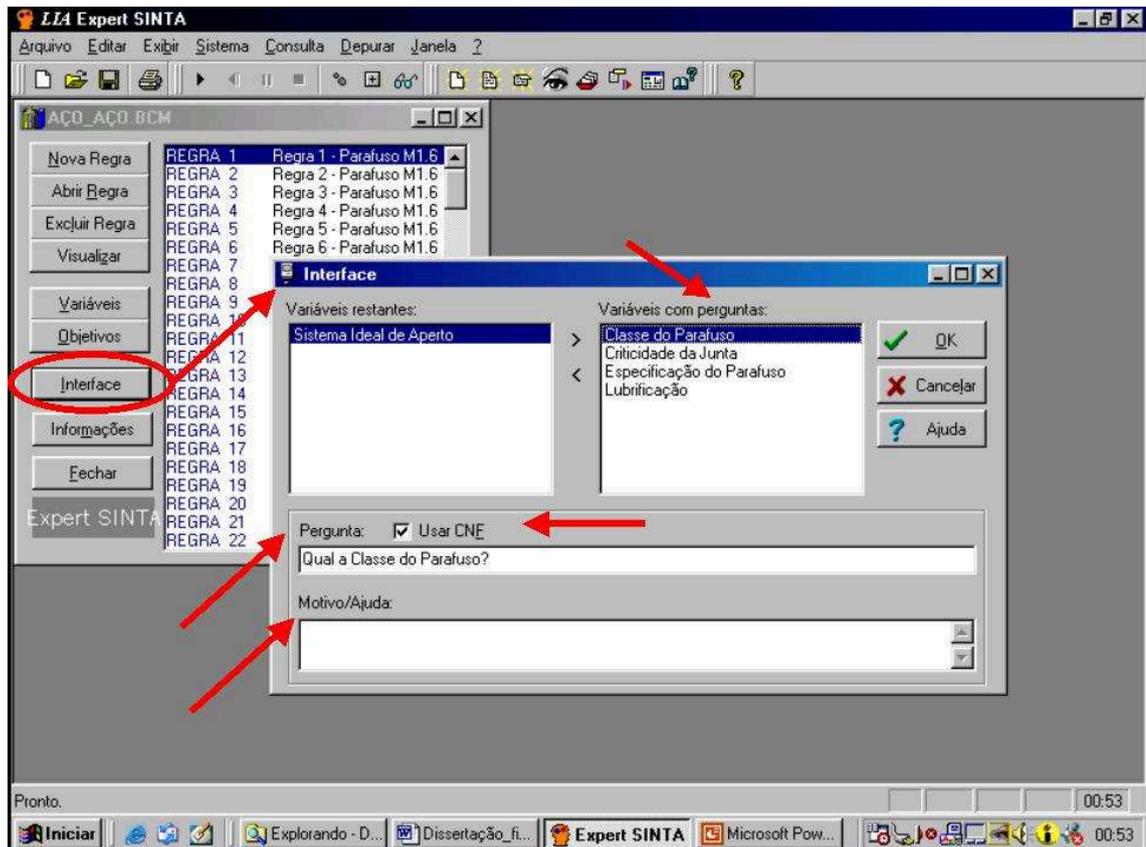


Figura 3.6 – Definição das perguntas de interface com usuário.

e) Criação das regras de produção.

As regras de produção nesse sistema especialista são usadas para modelar o conhecimento humano, o que torna ideal para problemas de seleção, onde o usuário seleciona os dados através das perguntas realizadas pelo sistema. A Figura 3.7 apresenta a tela onde é definido o número da regra que indica o posicionamento dessa regra na base de dados do sistema. É possível utilizar uma regra já existente como base para criação de outra regra, desde que os dados contidos nessa regra sejam semelhantes a outra.

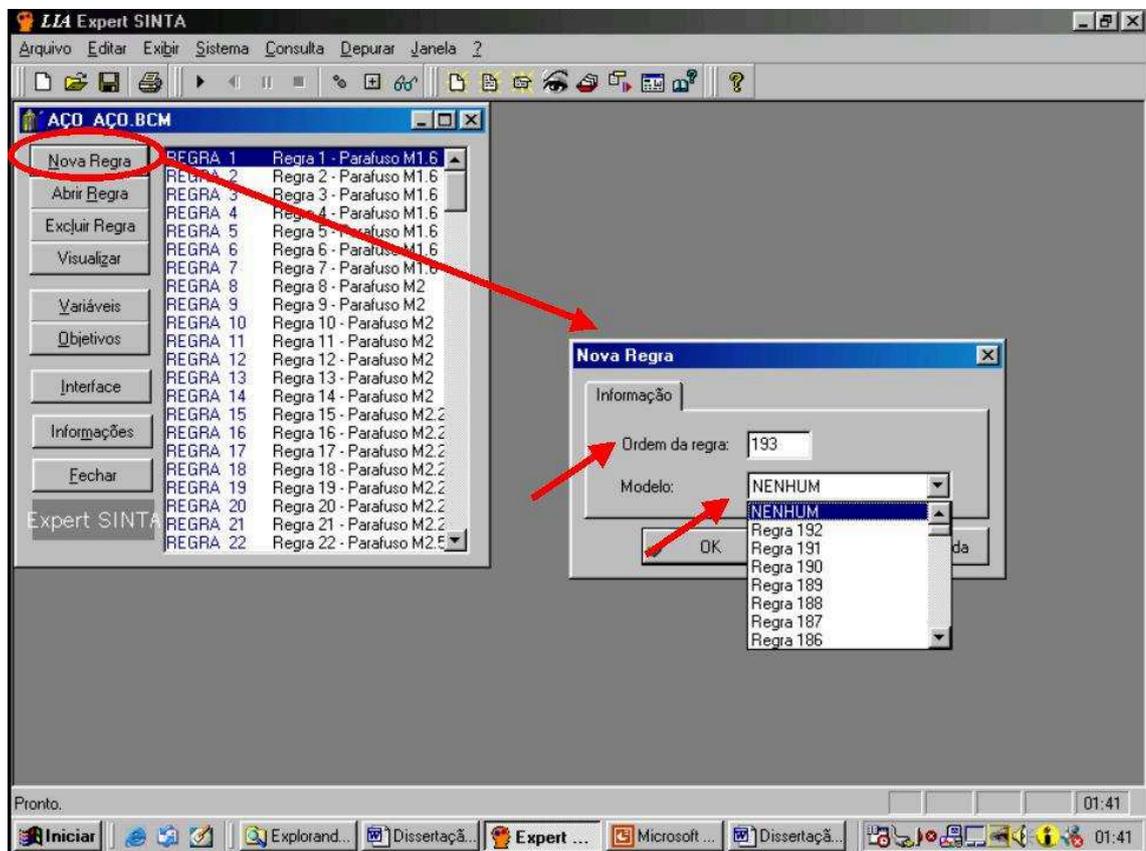


Figura 3.7 – Cadastro de nova regra de produção.

Com a definição do número da nova regra de produção é necessário efetuar a edição dessa nova regra utilizando as variáveis cadastradas na base de dados e através das condições SE.....ENTÃO....., é feito a inclusão de conectivos lógicos (NÃO, E, OU) relacionando os atributos (VARIÁVEIS) com o uso de probabilidades “CNF”, como mostrado na Figura 3.8.

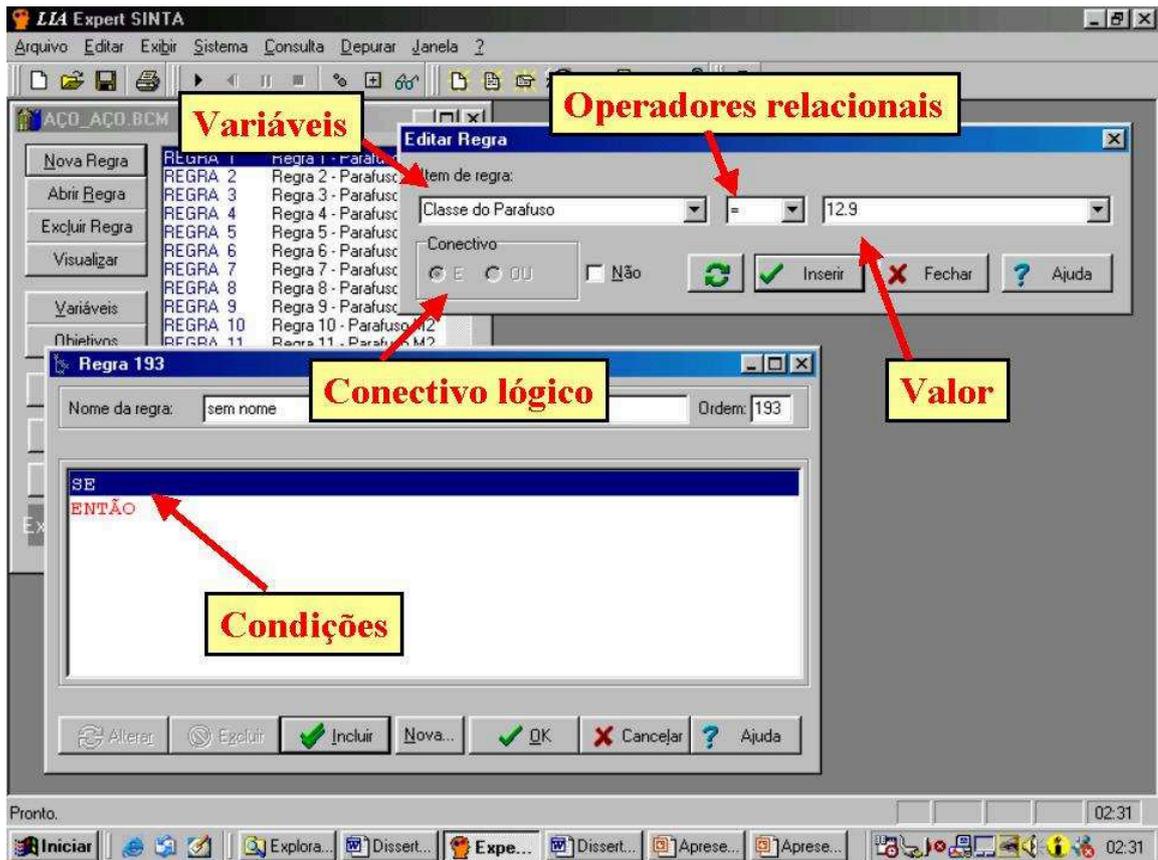


Figura 3.8 – Edição de uma regra de produção.

Na Figura 3.9 é mostrado uma regra de produção editada e cadastrada na base de dados do sistema utilizando as variáveis, as condições, os operadores relacionais, os conectivos lógicos e os valores.

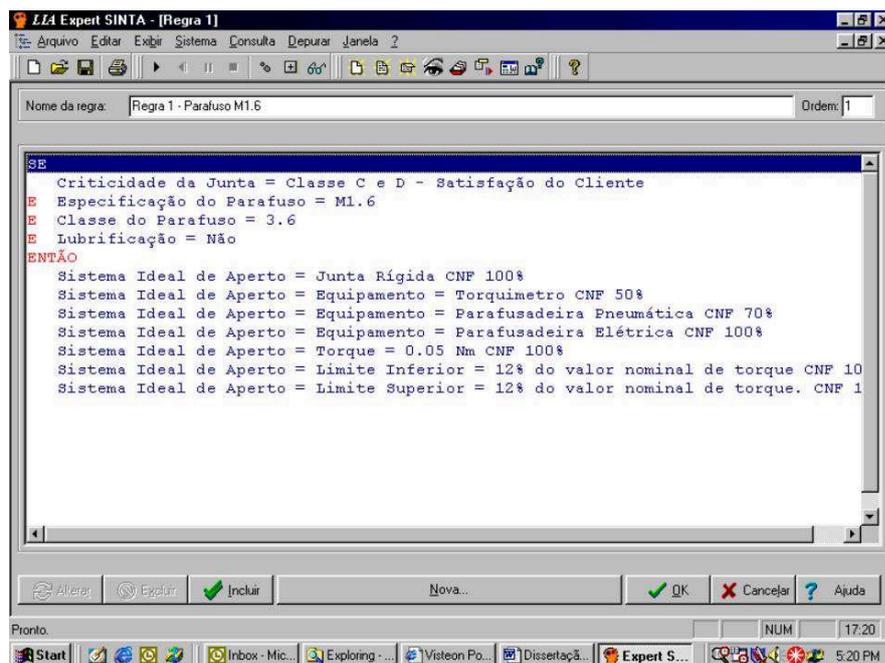


Figura 3.9 – Regra de produção editada e cadastrada na base de dados.

Capítulo 4 - Resultados e Discussão

Com a realização dos experimentos foi possível ordenar os dados e analisar os mesmos, auxiliando assim na programação do sistema especialista. Os resultados das análises e a consulta no sistema especialista são mostrados nos itens abaixo.

4.1 - Análise estatística do comportamento do equipamento para uma junta pré-estabelecida.

Através da planilha projetada em "Microsoft Excel" como mostrado na Figura 4.1, os dados de valores de torque foram coletados e registrados para realizar a análise estatística do comportamento dos equipamentos parafusadeira eletrônica, elétrica, pneumática e torquímetro analógico.

| ESTUDO DE CPK TESTES DE LABORATÓRIO - M. SHIMIZU | | | |
|--|--------|------------------------------------|--------|
| Equipamento: Material utilizado: Bloco de alumínio | | Data: | |
| Lado 01 - Torque de 10,0 a 15,0 Nm | | Lado 02 - Torque de 1,57 a 3,92 Nm | |
| | | | |
| MEDIÇÕES - Lado 01 | | MEDIÇÕES - Lado 02 | |
| Parafuso | Torque | Parafuso | Torque |
| 1 | | 26 | |
| 2 | | 27 | |
| 3 | | 28 | |
| 4 | | 29 | |
| 5 | | 30 | |
| 6 | | 31 | |
| 7 | | 32 | |
| 8 | | 33 | |
| 9 | | 34 | |
| 10 | | 35 | |
| 11 | | 36 | |
| 12 | | 37 | |
| 13 | | 38 | |
| 14 | | 39 | |
| 15 | | 40 | |
| 16 | | 41 | |
| 17 | | 42 | |
| 18 | | 43 | |
| 19 | | 44 | |
| 20 | | 45 | |
| 21 | | 46 | |
| 22 | | 47 | |
| 23 | | 48 | |
| 24 | | 49 | |
| 25 | | 50 | |
| Parafuso | Torque | Parafuso | Torque |
| 1 | | 26 | |
| 2 | | 27 | |
| 3 | | 28 | |
| 4 | | 29 | |
| 5 | | 30 | |
| 6 | | 31 | |
| 7 | | 32 | |
| 8 | | 33 | |
| 9 | | 34 | |
| 10 | | 35 | |
| 11 | | 36 | |
| 12 | | 37 | |
| 13 | | 38 | |
| 14 | | 39 | |
| 15 | | 40 | |
| 16 | | 41 | |
| 17 | | 42 | |
| 18 | | 43 | |
| 19 | | 44 | |
| 20 | | 45 | |
| 21 | | 46 | |
| 22 | | 47 | |
| 23 | | 48 | |
| 24 | | 49 | |
| 25 | | 50 | |

Figura 4.1 – Planilha para coleta de dados, torque (Nm)

Utilizando o “software” matemático MINITAB, os dados "valores de torque" foram armazenados na planilha do programa e através da função "capability analysis normal" os gráficos são gerados automaticamente para cada equipamento como mostrado nas Figuras 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5, respectivamente.

Análise de Capabilidade para Parafusadeira Eletrônica.

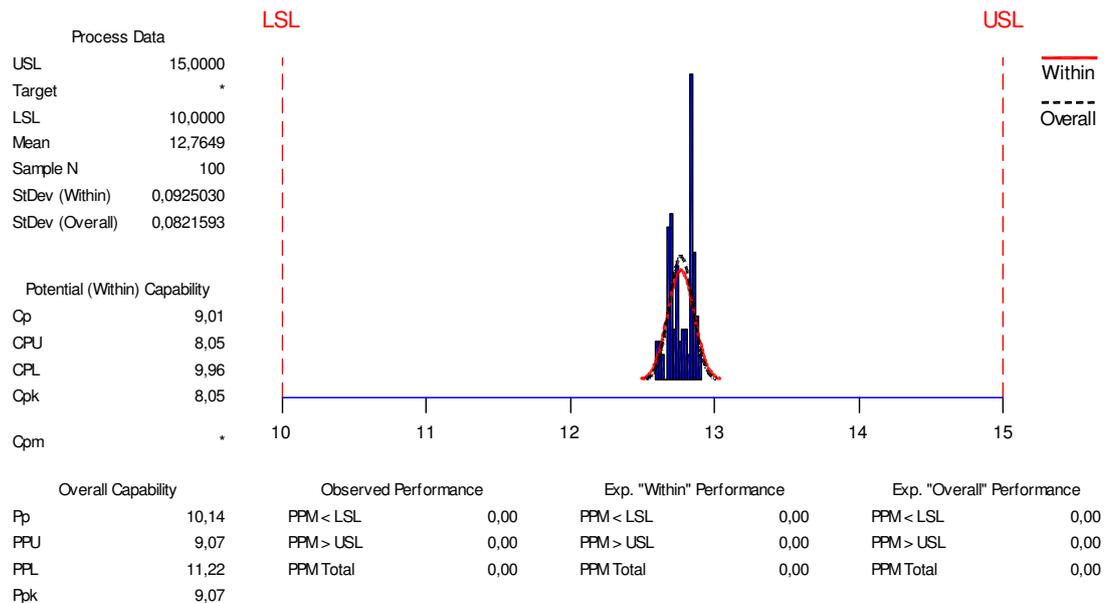


Figura 4.2 – Comportamento do equipamento parafusadeira eletrônica.

Analisando o gráfico na Figura 4.2 é possível identificar que a dispersão e o resultado do estudo de capacidade do processo $C_p = 9,01$ e $C_{pk} = 8,05$ é excelente comparando com $C_p = 1,33$ e $C_{pk} = 1,67$ que é o recomendado pela norma ISO TS16949 para processos de manufatura. Esses valores representam que o processo é capaz de produzir peças dentro da especificação de engenharia "10,0 Nm a 15,0 Nm" e o equipamento apresenta uma ótima repetibilidade de medição, tornando o processo centralizado em relação a especificação de engenharia.

O equipamento parafusadeira eletrônica controla e monitora os parâmetros de aperto através de um painel eletrônico e um transdutor de torque acoplado ao equipamento durante o processo de união dos componentes, esse tipo de equipamento é indicado para processos de manufatura onde o produto manufaturado rege normas governamentais e segurança do usuário, no caso do veículo automotor a parafusadeira eletrônica é usada para montagem dos parafusos da suspensão e chassi, para fixação de componentes do motor e itens de segurança.

Análise de Capabilidade para Parafusadeira Elétrica.

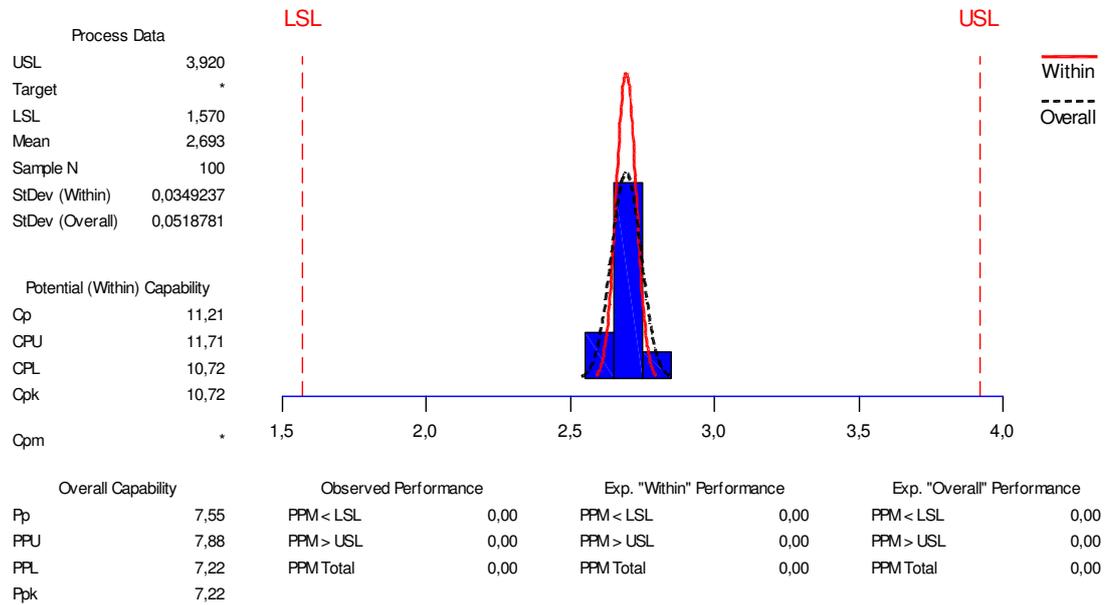


Figura 4.3 – Comportamento do equipamento parafusadeira elétrica.

A parafusadeira elétrica apresenta uma boa dispersão como mostrado na Figura 4.3, com resultados bem precisos além de ter um nível de ruído baixo, porém é limitada na utilização devido o torque máximo de aplicação ser 4.5 Nm. O resultado do estudo de capacidade do processo $C_p = 11,21$ e $C_{pk} = 10,72$ é excelente comparando com $C_p = 1,33$ e $C_{pk} = 1,67$ que é o recomendado pela norma ISO TS16949 para processos de manufatura. Esses valores representam que o processo é capaz de produzir peças dentro da especificação de engenharia "1,57 Nm a 3,92 Nm" e o equipamento apresenta uma ótima repetibilidade de medição, tornando o processo centralizado em relação a especificação de engenharia.

Esse tipo de equipamento é indicado para uso nos processos de manufatura de produtos que especificam a confiabilidade de funcionamento e satisfação do cliente final. Na fabricação do veículo é bastante utilizada nos processos de montagem dos componentes de acabamento, como painel de instrumentos, acabamentos internos, fixação de chicotes, etc...

Análise da Capabilidade para Parafusadeira Pneumática

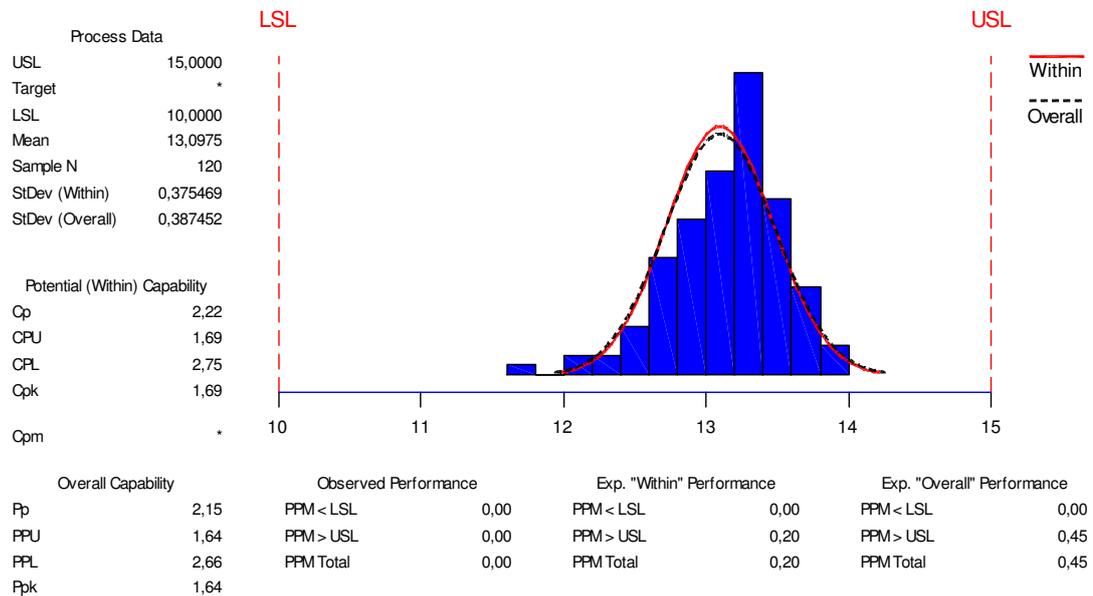


Figura 4.4 – Comportamento do equipamento parafusadeira pneumática.

Analisando os dados estatísticos apresentados no gráfico da Figura 4.4, é evidente a dispersão do processo quando o equipamento parafusadeira pneumática é utilizado para união de componentes, o $C_p = 2,22$ e $C_{pk} = 1,69$ estão bem próximos do recomendado pela norma ISO TS16949 que é $C_p = 1,33$ e $C_{pk} = 1,67$, porém o processo é capaz de produzir peças dentro da especificação de engenharia. A repetibilidade do equipamento possui uma grande variação que pode ser vista no histograma, esta dispersão mostra uma descentralização do processo, para este caso é recomendado a calibração e ajuste do equipamento para centralização da média com o valor nominal.

O equipamento parafusadeira pneumática possui somente o controle do torque e o monitoramento geralmente é feito por amostragem utilizando o torquímetro analógico ou digital, este monitoramento é feito para verificar a repetibilidade do equipamento durante o processo de manufatura. Na utilização desse tipo de equipamento, fatores como o modo de operar, a variação de pressão na rede de ar comprimido e até mesmo a lubrificação do equipamento interferem no valor de torque final. A aplicação é recomendada em produtos que não especificam alto grau de confiabilidade, geralmente em processos de montagem na indústria eletrônica. Outro ponto importante a ser

considerado é com relação ao ruído, quando a decisão for utilizar um equipamento pneumático deve-se atentar ao tipo de aplicação e a quantidade de equipamentos necessários para o processo de montagem, para que o ruído máximo não ultrapasse ao especificado na norma NR 15 – atividade e operações insalubres – anexo 1, que é 85dba em 8 horas de trabalho contínuo.

Análise de Capacidade para Torquímetro Analógico.

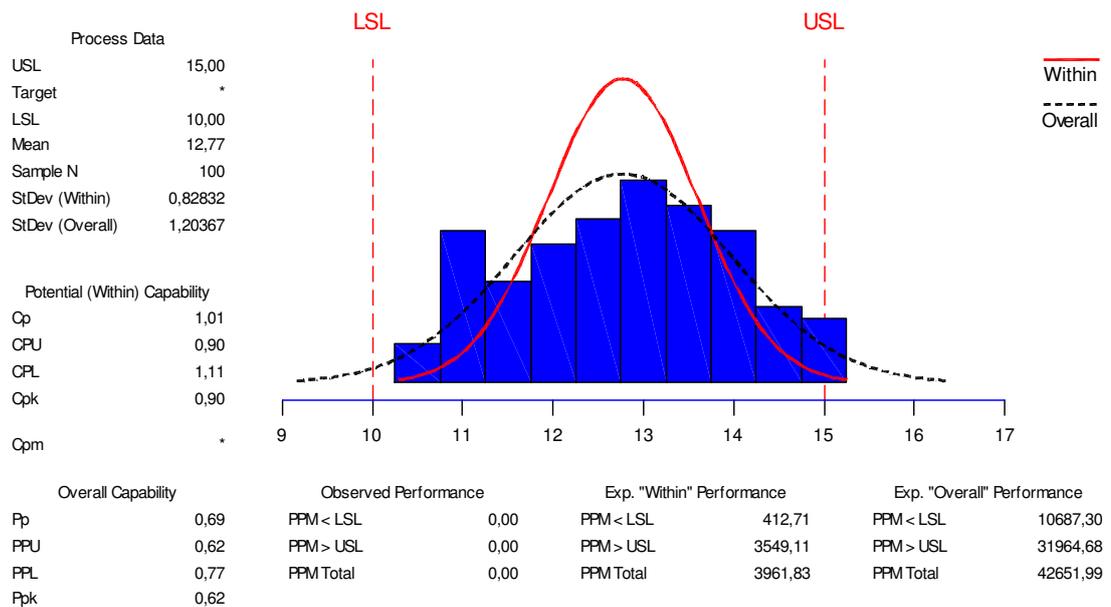


Figura 4.5 – Comportamento do equipamento torquímetro analógico.

O torquímetro analógico é o que apresenta a maior variação como mostrado na Figura 4.5, neste caso os fatores que mais influenciam é o modo de operar e o momento de efetuar a leitura na escala do equipamento, gerando dúvidas e induzindo ao erro, este tipo de equipamento é mais utilizado para checar o valor de torque aplicado por equipamentos como a parafusadeira pneumática e também para uso em laboratórios de medição e controle. Os dados estatísticos indicam que o torquímetro analógico não é o equipamento mais recomendado para um processo de manufatura, além de apresentar uma dispersão grande existe também o fator tempo de operação. O estudo de capacidade do processo mostra como resultado essa dispersão onde os valores de $C_p = 1,01$ e $C_{pk} = 0,90$ estão abaixo do recomendado pela norma ISO TS16949 que é $C_p = 1,33$ e $C_{pk} = 1,67$.

O gráfico na Figura 4.6 mostra o tempo de operação dos equipamentos avaliados quando utilizados nos processos de manufatura.

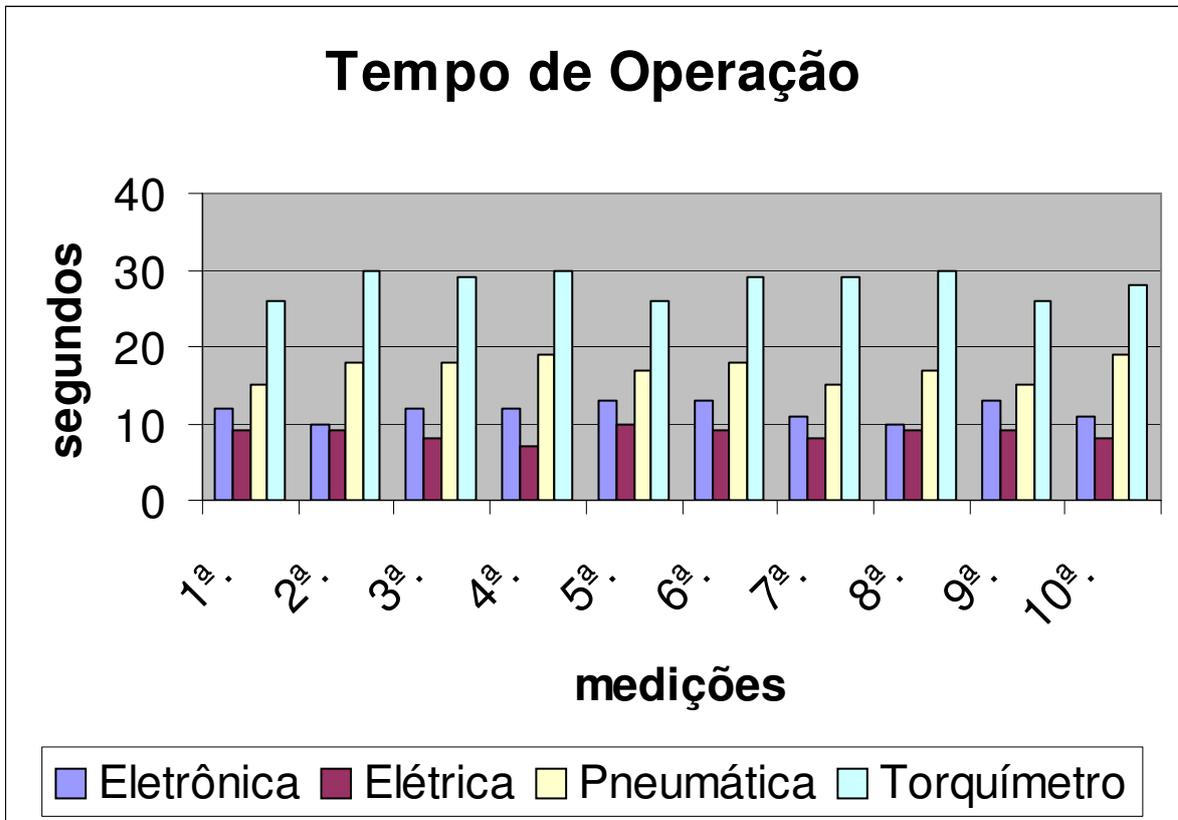


Figura 4.6 – Tempo de operação no processo de montagem.

Os dados do gráfico na Figura 4.6 são importantes no momento da definição do equipamento ideal para a condição de processo desejada.

Atualmente os custos de um equipamento para controle de torque variam de R\$ 500,00 para um torquímetro a R\$ 60.000,00 para uma parafusadeira eletrônica (M.Shimizu).

Portanto, a análise do projeto e definição de um sistema deve ser feita levando em consideração os fatores qualidade, custos, segurança, confiabilidade e benefício, além de pontos operacionais como ergonomia e segurança do operador.

4.2 - Tempo para cálculo e definição dos parâmetros de torque pelo engenheiro *versus* consulta automática no banco de dados “SEVAT”.

O objetivo dessa pesquisa é anotar o tempo dedicado do engenheiro para calcular e especificar um sistema de aperto para uma condição de junta conhecida. Para realizar esse experimento foram selecionados três engenheiros no qual realizaram os cálculos e após, para o mesmo objetivo consultaram o sistema “SEVAT”.

O enunciado do exercício considera que é uma junta rígida classe tipo B e com material em aço carbono e o parafuso utilizado para fixar essa junta é M8 com classe 8.8, sem lubrificação. O volume de produção esperado é de 60 peças/hora. O objetivo é calcular o valor de torque ideal para esta fixação, bem como definir o melhor equipamento para o processo de montagem, considerando o fator custo x benefício.

O resposta esperada do problema acima, é mostrado nos cálculos abaixo, utilizando a equação 4.1 - força de união (Atlas Copco, 2003).

$$F_u = \frac{M}{0,16P + 0,58\mu G d_2 + 0,5\mu K D_m} \quad (4.1)$$

Onde:

F_u = Força de união

M = Torque Aplicado

P = Passo da rosca

μG = Coeficiente de atrito da rosca

μK = Coeficiente de atrito da cabeça do parafuso

d₂ = Diâmetro primitivo

D_m = Diâmetro médio da cabeça do parafuso

Considerando,

F_u = 14000 N

M = ?

P = 1,25 mm = 0,00125 m (para parafuso M8 – classe 8.8)

$$\mu G = 0,15$$

$$\mu K = 0,15$$

$$d_2 = 7,188 \text{ mm} = 0,007188 \text{ m (para parafuso M8 – classe 8.8)}$$

$$D_m = 13 \text{ mm} = 0,013 \text{ m (para parafuso M8 – classe 8.8)}$$

Então,

$$M = 14000 (0,16 \times 0,00125 + 0,58 \times 0,15 \times 0,007188 + 0,5 \times 0,15 \times 0,013)$$

$$M = 25,2 \text{ Nm}$$

Definido o torque ideal para fixação da junta rígida, é necessário definir qual o melhor equipamento para esta aplicação.

Nesta fase, é necessário que o engenheiro tenha bem definido quais as especificações do produto e as informações de volume de produção, custos de materiais, mão-de-obra disponível e a verba destinada para investimento no processo.

Como descrito no enunciado o volume de produção é de 60 peças / hora e para uma junta rígida com classe B que rege confiabilidade do produto e satisfação do cliente, pode-se optar para uma parafusadeira pneumática com monitoramento de torque através de torquímetro, isto é possível pelo fato do volume de produção ser considerado baixo do ponto de vista industrial, porém para uma confiabilidade maior e tendo verba disponível para o processo, recomenda-se a utilização de uma parafusadeira eletrônica que controla e monitora os parâmetros de aperto no momento de fixação da junta. A Tabela 4.1 mostra o resultado do experimento.

Tabela 4.1 – Resultado do experimento cálculo *versus* consulta.

| Engenheiros | Tempos | | Resposta do Cálculo | Resposta da Consulta |
|-------------|----------|----------|---|---|
| | Cálculos | Consulta | | |
| Carlos | 95 min. | 1 min. | Torque = 36 Nm / parafusadeira eletrônica ou pneumática | Torque = 24 Nm / parafusadeira eletrônica 100%, parafusadeira pneumática 70%. |
| Fernando | 100 min. | 1 min. | Torque = 30 Nm / parafusadeira eletrônica ou pneumática | Torque = 24 Nm / parafusadeira eletrônica 100%, parafusadeira pneumática 70%. |
| Jorge | 120 min. | 1 min. | Torque = 27 Nm / parafusadeira pneumática com torquímetro | Torque = 24 Nm / parafusadeira eletrônica 100%, parafusadeira pneumática 70%. |

4.3 – Validação do Sistema Especialista “SEVAT”.

O sistema inteligente projetado a partir da utilização de uma ferramenta computacional, mostrou como resultado principal a facilidade de programação e ordenação dos dados, o banco de dados formado é bastante rico, considerando que as informações contidas na base de dados são adquiridas a partir de dados reais coletados dos processos de manufatura e através de experiências realizadas com os equipamentos.

A avaliação do resultado consultando o sistema “SEVAT” é descrito conforme os passos abaixo:

a) Acessando o sistema.

Para acessar o sistema basta “clique” duas vezes no ícone do Expert SINTA e o “menu” principal aparecerá na tela do computador. Através da pasta arquivo, escolher a base de dados desejada e acionar a tecla “F9”, neste momento aparecerá as informações sobre a base de dados, e caso não seja a base desejada, fechar a janela e escolher nova base para consulta. Estando na base correta “clique” em OK e continuar a consulta. A Figura 4.7 mostra a tela inicial do sistema.

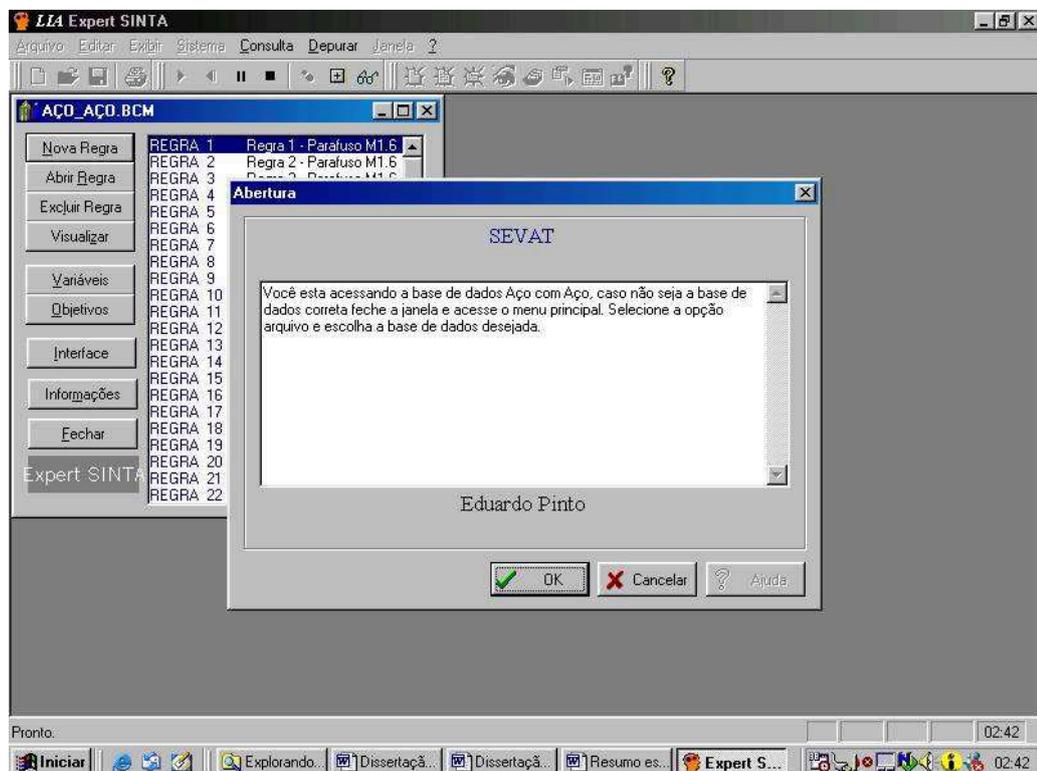


Figura 4.7 – Tela inicial do sistema “SEVAT”.

b) Escolha da primeira opção.

Nessa tela o usuário define qual o tipo de criticidade de junta o seu produto especifica. A escolha deve ser feita clicando em uma das opções e após “clique” em Ok para continuar a consulta. A Figura 4.8 mostra a tela de escolha da criticidade de junta.

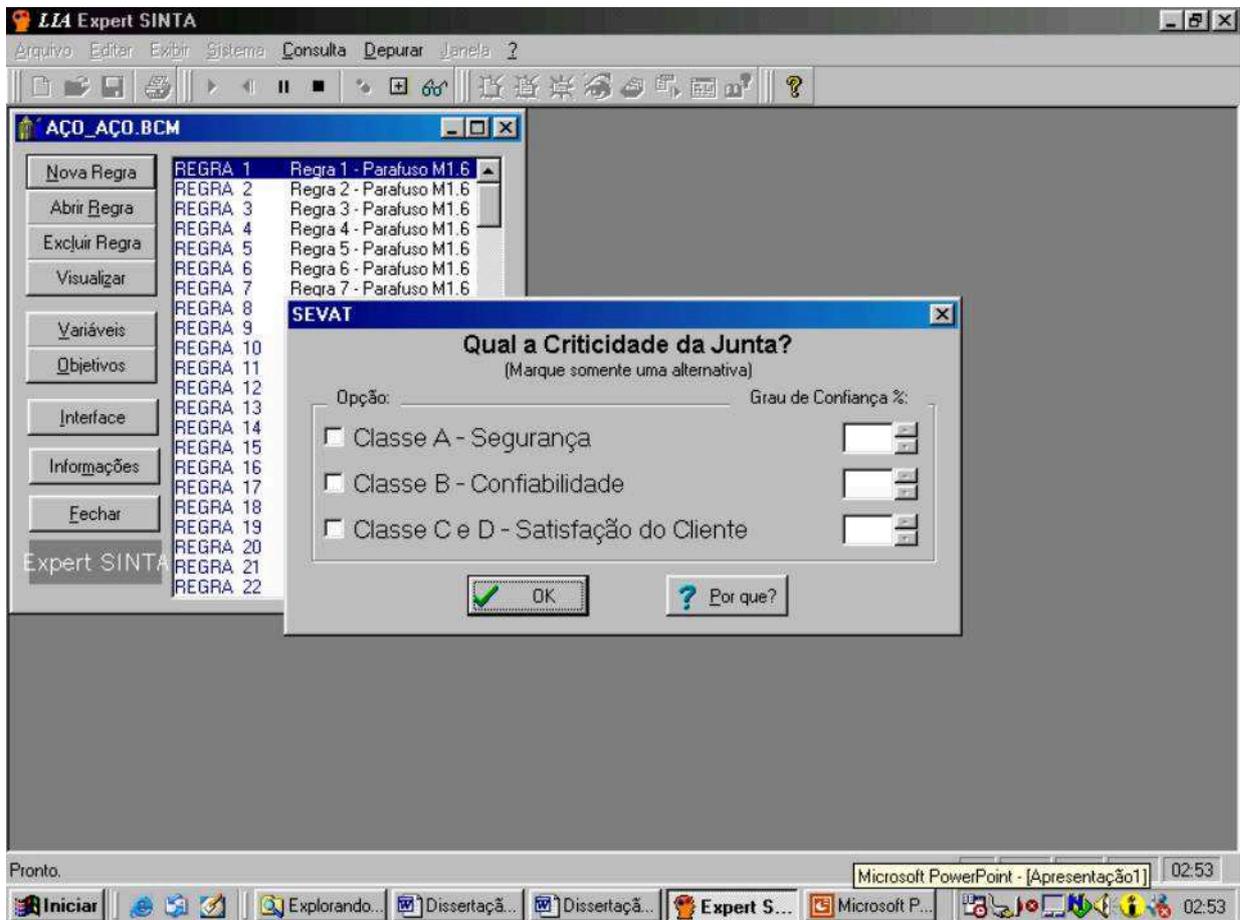


Figura 4.8 – Tela de escolha da criticidade de junta.

c) Escolha do tipo de parafuso.

Nessa tela o usuário especifica o tipo de parafuso que deseja utilizar na fixação da junta. Clicando na opção de parafuso desejada “clique” em OK e continuar a consulta. A Figura 4.9 mostra a tela de escolha do parafuso.

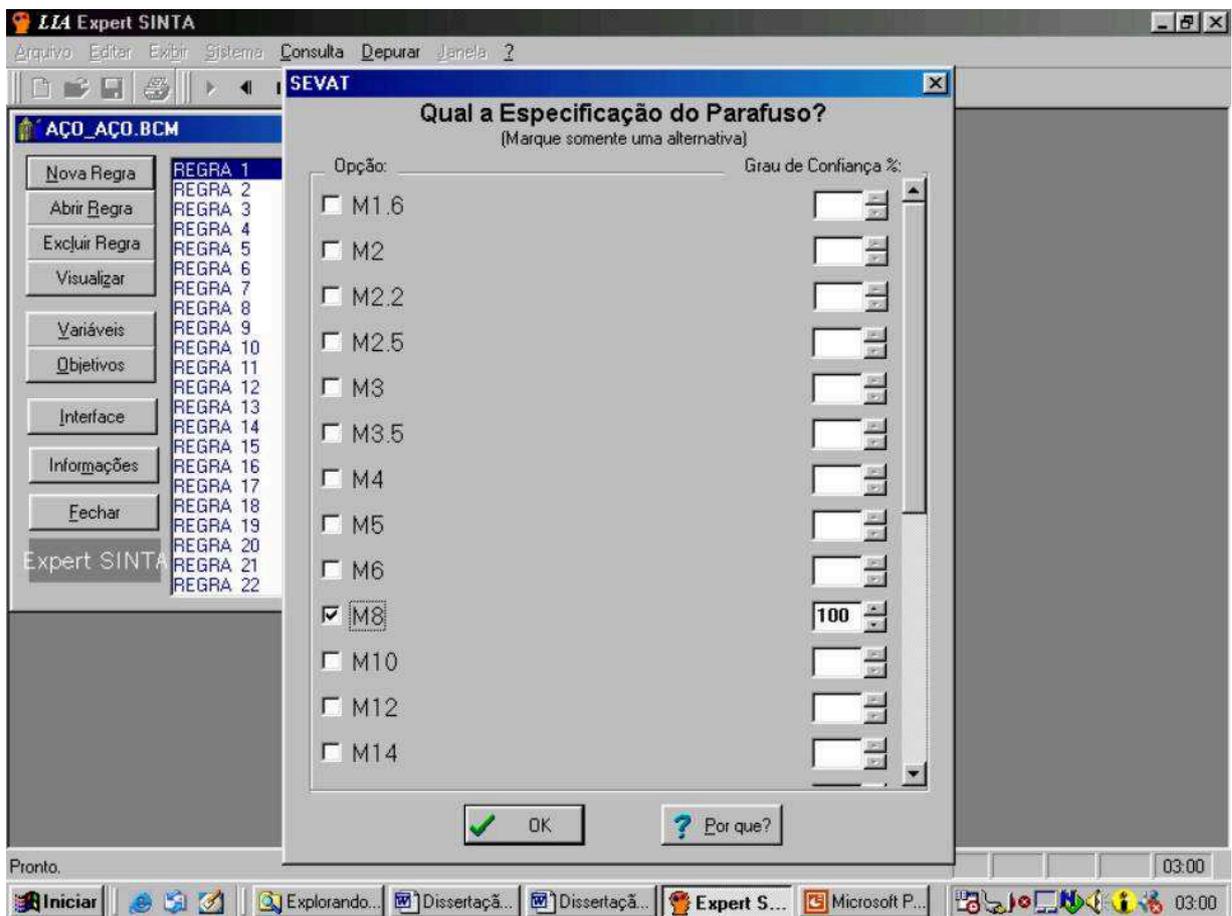


Figura 4.9 – Tela de especificação do parafuso.

d) Definição da classe do parafuso.

Nessa tela o usuário define qual a classe do parafuso conforme especificação de engenharia do produto. Clicando em uma das opções de classe do parafuso “clique” em OK e prossiga a consulta. A Figura 4.10 mostra a tela de definição da classe do parafuso.

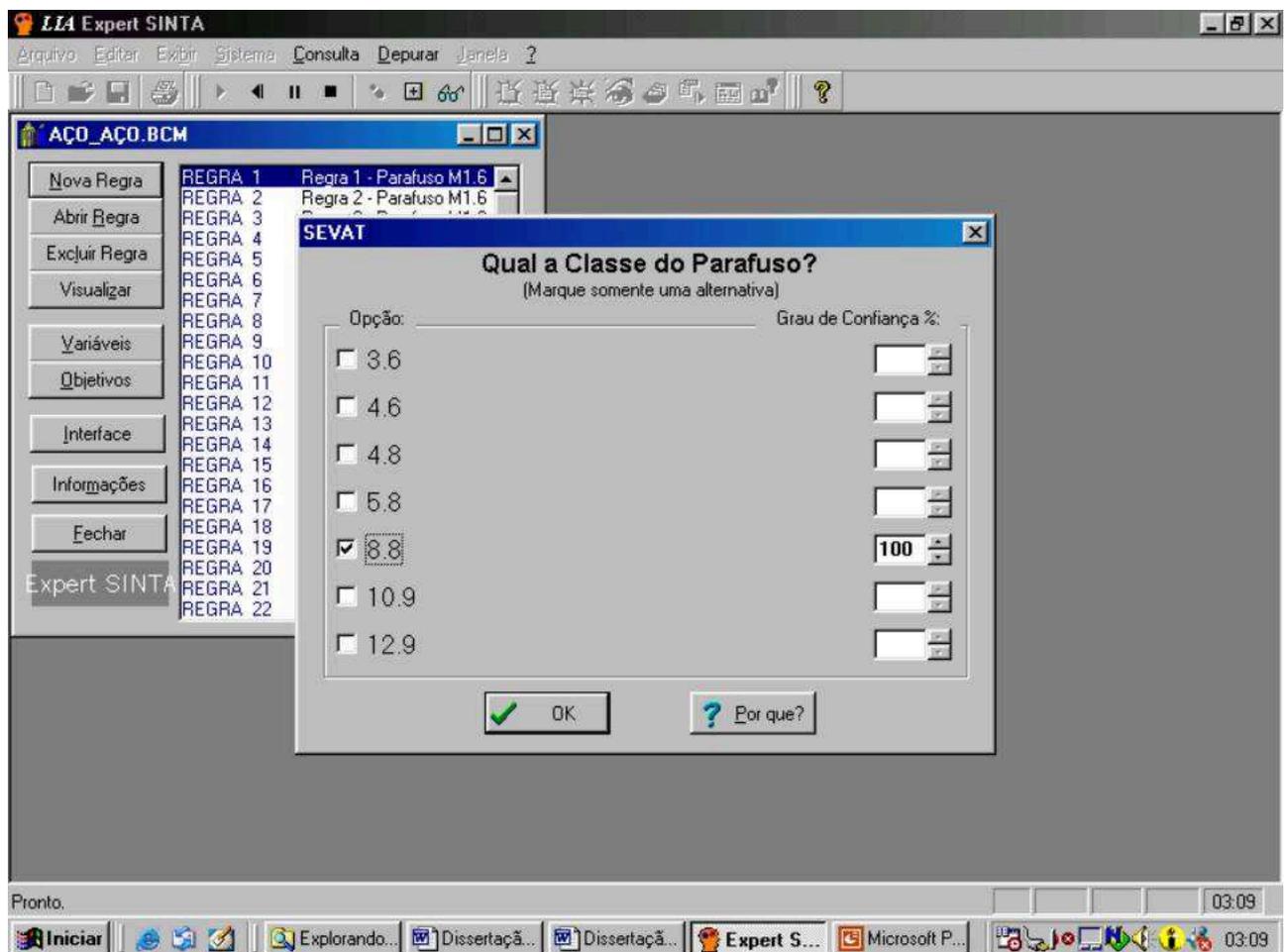


Figura 4.10 – Tela de definição da classe do parafuso.

e) Definição da lubrificação do parafuso.

Nessa tela o usuário define se o parafuso será lubrificado ou não na fixação da junta, essa definição depende da condição de trabalho em que a junta será submetida, portanto é importante entender o funcionamento do produto e qual a sua importância no sistema com um todo. A Figura 4.11 mostra a tela de definição da lubrificação do parafuso.

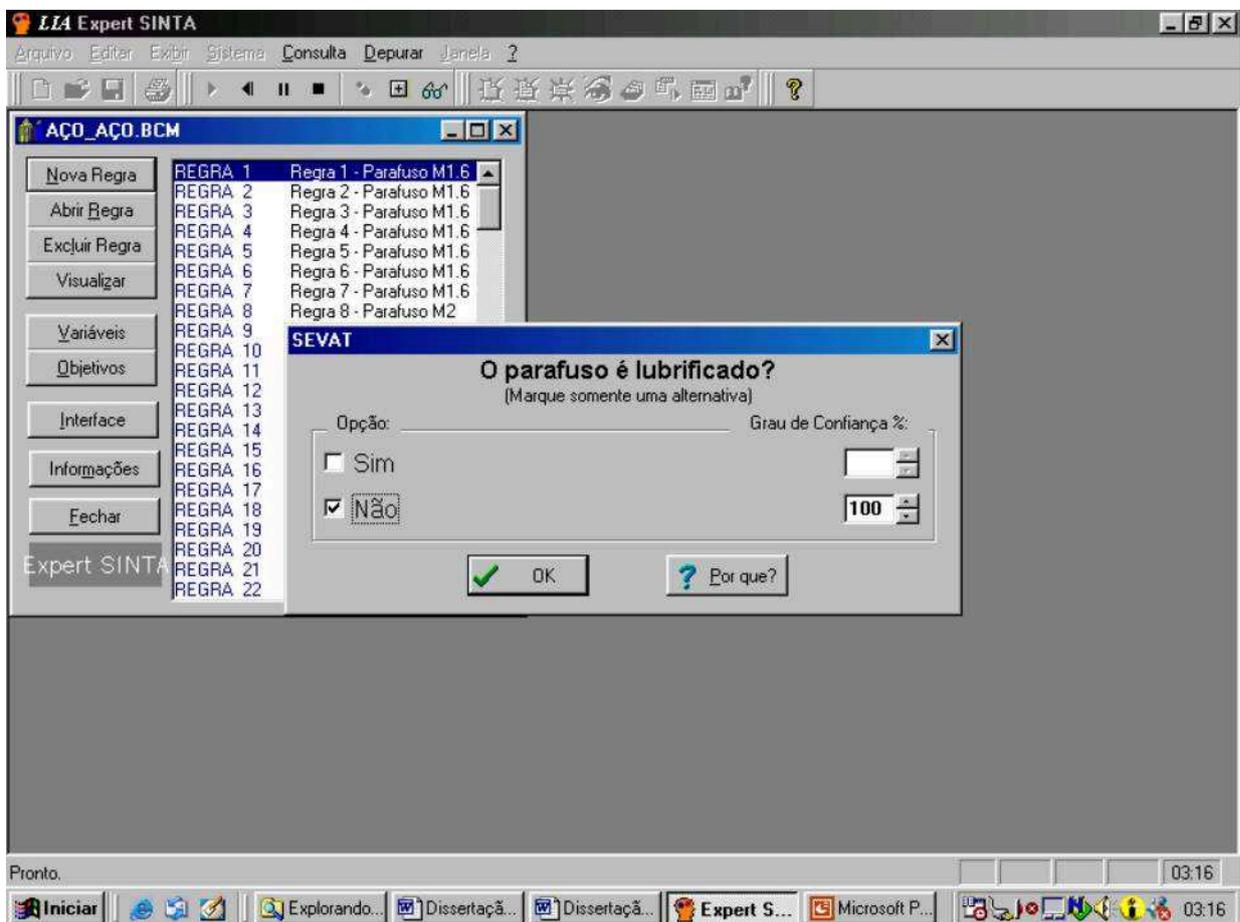


Figura 4.11 – Tela de definição da lubrificação do parafuso.

f) Resultado da consulta.

Após ter definido todos os dados desejados o sistema inteligente apresenta o resultado da consulta para a condição de fixação escolhida. Nessa tela também é possível analisar o histórico da pesquisa, todos os valores de resultado encontrados e a estrutura do sistema especialista. A Figura 4.12 mostra esses dados para análise do usuário.

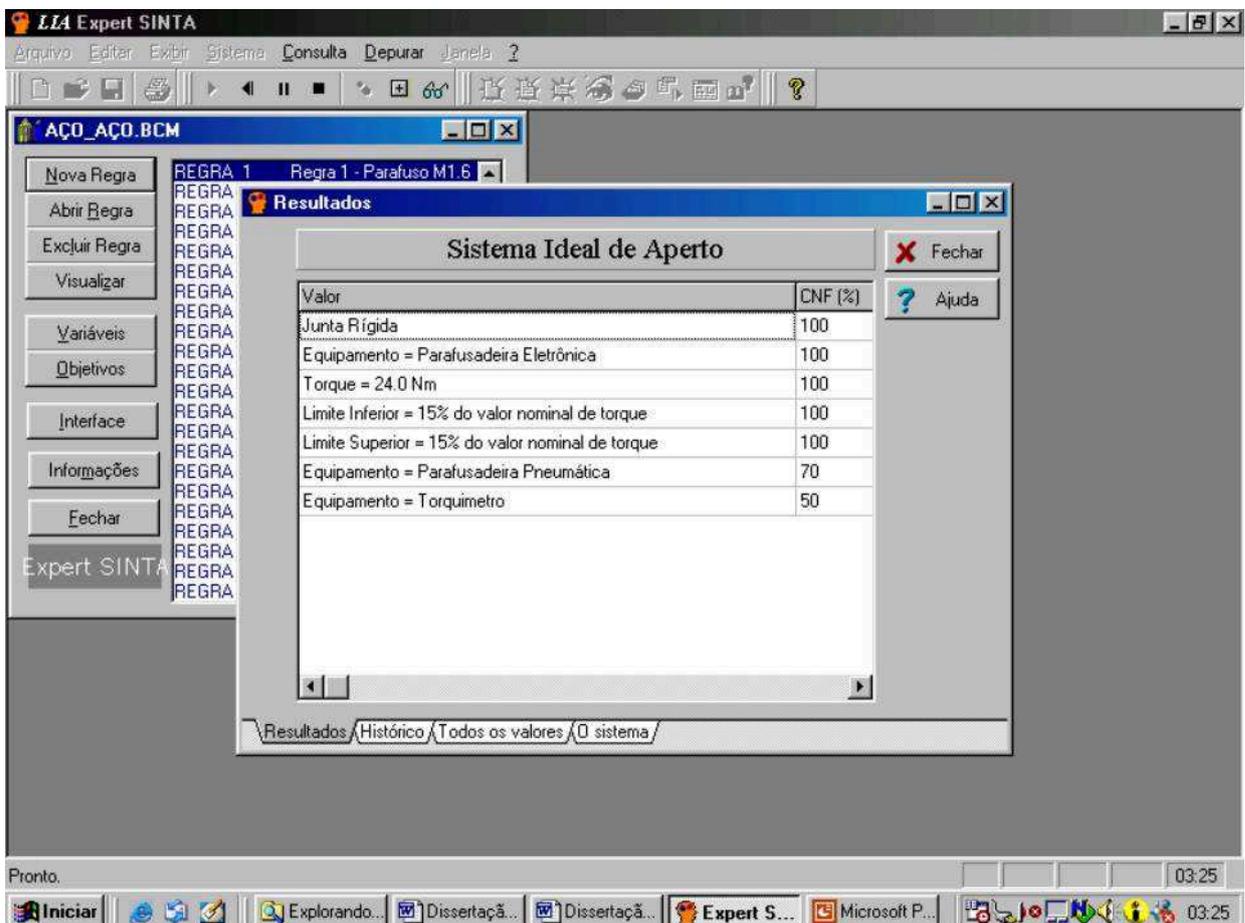


Figura 4.12 – Tela de apresentação dos resultados.

Com a apresentação do resultado, a consulta ao sistema especialista é concluída e o usuário pode iniciar novas consultas no “menu principal” seguindo os passos de um a seis.

Capítulo 5 – Conclusão

Os resultados estatísticos apresentados para cada equipamento avaliado, indicam que a utilização de equipamentos como parafusadeira eletrônica e elétrica são muito confiáveis e garantem a qualidade e segurança na fixação de componentes de um produto. Essa qualidade e segurança é comprovada pelos valores de Cp (Capacidade do processo) e Cpk (Capabilidade do processo), pois aplicando-se o torque adequado conforme a especificação de engenharia obtém-se a força de união desejada.

O equipamento eletrônico apresenta recursos para controlar e monitorar os parâmetros de aperto, como: rotação (rpm), torque mínimo, torque máximo e ângulo. Esses recursos permitem que a leitura do valor de torque através de um transdutor no momento do aperto de uma junta ocorra automaticamente em tempo real, ou seja, leitura dinâmica do torque.

A parafusadeira elétrica possui uma única rotação e o torque adequado é ajustado através da calibração do equipamento utilizando-se um coletor de dados e um transdutor de torque acoplado a parafusadeira. A parafusadeira eletrônica ou elétrica permitem a implementação de dispositivos à prova de erros utilizando um "CLP" (controlador lógico programável). Esse tipo de dispositivo garante que o produto só avançará no processo após o torque adequado ser atingido, caso contrário, o "CLP" não habilita o equipamento para um próximo aperto.

No caso da parafusadeira pneumática o procedimento de ajuste e calibração é o mesmo que o da parafusadeira elétrica, porém necessitam de cuidados especiais como: controle da pressão do ar comprimido, controle da lubrificação e checagem do torque aplicado através de um torquímetro analógico ou digital. A análise estatística indica uma variabilidade significativa na leitura dos valores de torque desse equipamento, que pode interferir no controle de processo. Neste caso, uma calibração é requerida para ajustar o equipamento adequando os valores de torque para a média do processo, desta forma, é possível melhorar sensivelmente o resultado.

A análise estatística do torquímetro analógico comprova que a utilização desse tipo de equipamento no processo de manufatura, não é o adequado, pois além de apresentar uma grande variabilidade também depende totalmente da habilidade do operador, além de demandar um tempo razoável de manuseio e operação.

O tempo de operação medido em cada equipamento comprova que o controle automático dos parâmetros de aperto aumentam a produtividade entre 37% e 77%, comparando a um processo de montagem manual com torquímetro analógico.

O sistema inteligente desenvolvido auxilia o engenheiro a especificar o sistema de aperto ideal para cada condição de junta desejada. A base de dados contém as informações e os parâmetros necessários para cada tipo de aplicação, considerando o equipamento ideal para utilização e os parâmetros corretos para controle do aperto, obtendo-se assim os melhores resultados. A base de dados é muito eficaz, pois através da entrada de dados conhecidos, o sistema efetua a consulta usando um motor de inferência, e apresenta o resultado rapidamente, dando assim ao engenheiro uma confiabilidade e agilidade para a tomada de decisão.

A utilização do sistema inteligente como ferramenta de consulta e tomada de decisão, reduz o tempo de cálculo e testes em aproximadamente 98%. O usuário quanto mais utilizar o sistema mais habilidade adquirirá, obtendo os resultados mais rapidamente.

O banco de dados formado é um histórico que pode ser alimentado a cada nova condição, o que o torna cada vez mais robusto. A inclusão de novos dados é rápida e quanto mais informações forem armazenadas, mais usuários serão beneficiados, e com o tempo ganho para se tomar uma decisão é possível dedicar-se para outras atividades, gerando redução de custos e investimentos desnecessários.

Referências Bibliográficas

- [1] Turban, E., Aronson J.E., Decision Support Systems and Intelligent Systems, 396-583, 2001.
- [2] Rezende, Solange Oliveira, Sistemas Inteligentes, 3-87, 2003.
- [3] Winston, Patrick Henry, Artificial Intelligence Third Edition, 167-169, 1992.
- [4] Krishnamoorthy, C.S., Rajeev, S., Artificial Intelligence and Expert Systems for Engineers, 29-35, 1996.
- [5] Bittencourt, G., Um ambiente para ensino e desenvolvimento de sistemas especialistas. III Workshop sobre Educação em Informática/IV Congresso Ibero-Americano de Educação Superior em Computação, 1995. 29 de julho a 4 de agosto, Canela, RS.
- [6] Winstanley, Graham, Artificial Intelligence in Engineering, 39-44, 1991.
- [7] D.A. Waterman. A Guide to Expert Systems. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, MA, 1986.
- [8] B. Nebel and K. Von Luck. Issues of integration and balancing in hybrid knowledge representation systems. In K. Morik, editor, Proceedings of the 11th German Workshop on Artificial Intelligence, pages 115-123, 1987. September-October.
- [9] Expert SINTA Shell, Laboratório de Inteligência Artificial – Universidade Federal do Ceará, Versão 1.1.2.8, 1998.
- [10] Bullinger, Hans-Jorg; Warschat, Joachim and Fisher, Dietmar, Knowledge-based system for material selection for design with new materials, Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation, University of Stuttgart, Germany, Vol 4 No 2 June 1991.
- [11] Siang Kok Sim and Yiu Wing Chan, A Knowledge-Based expert system for rolling-element bearing selection in mechanical engineering design, Artificial Intelligence in Engineering, 1991, Vol 6, No.3.
- [12] Dentcho Batanov, Nagen Nagarur and Prapan Nitikhunkasem, EXPERT-MM: A Knowledge-based system for maintenance management, Artificial Intelligence in Engineering, 283-291, Elsevier Science Limited, 1994.
- [13] K. Lunn, I.G. Archibald, J.J. Redfearn, A. Robinson, A. Bamigboye, M.D. Cope and B.T. Hird, An expert system for formulating lubricating oils, Artificial Intelligence in Engineering, 1991, Vol 6, No. 2.

- [14] Volvo, Tecnologia Four-C, Alpha drive, ano 2, Agosto,2002.
- [15] Harith Alani, Sanghee Kim, David E. Millard, Mark J. Weal, Wendy Hall, Paul H. Lewis and Nigel R. Shadbolt, Automatic Ontology-Based Knowledge from Web Documents, IEEE Intelligent Systems, 14-21, Vol 18, No. 1, 2003.
- [16] Freitas R.; Prado, J.; Batista Neto, J.; Nakamiti, G; Pila, A, Inteligência Artificial aplicada à Automação, 352-356, IV Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, Setembro 1999.
- [17] Atlas Copco, Tecnologia do Aperto, CD Interativo Qualidade Assegurada, 2003.
- [18] José Rodrigues de Carvalho; Paulo Luiz Jardim de Moraes, Órgãos de Máquinas Dimensionamento, 3^a. edição, 1984.
- [19] Giovanni Manfé; Rino Pozza; Giovanni Scarato, Desenho Técnico Mecânico, Volume 2.
- [20] Newton C. Braga, O Parafuso e o Macaco (entendendo e calculando), 40-41, artigo publicado na revista Mecatrônica fácil, Ano3 – no.16, Maio-Junho/2004.
- [21] Technical Committee ISO/TC 118, International Standard ISO 5393, second edition 1994-05-01.
- [22] TOHNICHI Company, Technical Data Manual, 9-65, 1999.
- [23] M.Shimizu, Manual Tecnologia de Fixação, 1-21, 1996.
- [24] Jairo Brandrão, Apostila de Conceitos Estatísticos, 1-27, Visteon Sistemas Automotivos, 1997.
- [25] Software matemático MINITAB release 13.30, licensed for use by Visteon, WNN1330.00973, Copyright © 2000.