

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

SISTEMATIZAÇÃO E AUTOMAÇÃO
DO AMBIENTE DE PROJETO:
O ENFOQUE DA SINTAXE.

Autor: Mestre Engenheiro Francisco José de Almeida.

Orientador: Prof. João Lirani, PhD.



DEDALUS - Acervo - EESC



31100013551

Documento apresentado à Banca Examinadora, para defesa de Tese de Doutorado junto ao Curso de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos - USP, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Mecânica.

São Carlos - SP
Novembro de 1997

Class.	TESE
Cott.	0251
Tombo	10125/98

3 11 00013551

st 0979463

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC-USP

A447s Almeida, Francisco José de
Sistematização e automação do ambiente de
projeto : o enfoque da sintaxe / Francisco José de
Almeida. -- São Carlos, 1997.

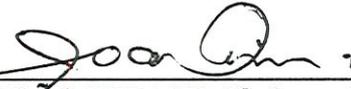
Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia
de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1997.
Área: Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Dr. João Lirani.

1. Projeto conceitual. 2. Metodologia de
projeto conceitual. 3. Sistema inteligente de
projeto auxiliado por computador. I. Título.

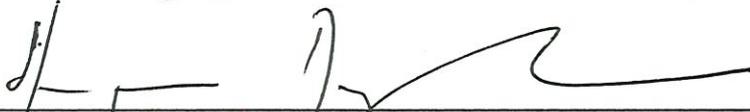
FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **FRANCISCO JOSÉ DE ALMEIDA**

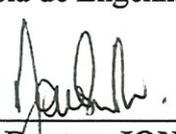
Tese defendida e aprovada em 17-04-1998
pela Comissão Julgadora:



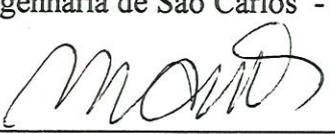
Prof. Titular **JOÃO LIRANI (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



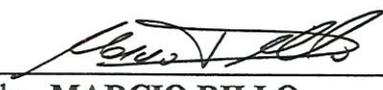
Prof. Titular **HENRIQUE ROZENFELD**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



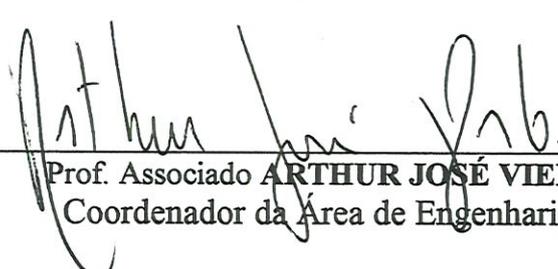
Prof. Doutor **JONAS DE CARVALHO**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Profa. Titular **MARIA CAROLINA MONARD**
(Instituto de Ciências Matemáticas de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Associado **MARCIO RILLO**
(Escola Politécnica - Universidade de São Paulo)



Prof. Associado **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO**
Coordenador da Área de Engenharia Mecânica



JOSE CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Agradeço:

Ao prof. João Lirani, PhD, pela efetiva orientação e auxílio constante

Ao prof. Dr. Arthur José Vieira Porto, pelo apoio inclusive na área administrativa

Ao prof. Mestre Mitsuo Inouye, companheiro de doutorado, pelas discussões acerca de nosso trabalhos

À Zilda, ao Amauri, ao Godoy, ao Volnei, ao Robson e ao Vinícius que sempre me deram preferência no uso dos recursos do Laboratório de CADCAE

À Ana Paula, por “quebrar os meus galhos”

Aos professores que me disponibilizaram um pouco do seu conhecimento nas disciplinas de pós-graduação

Ao Serviço de Biblioteca da EESC-USP e à Biblioteca do ICMSC-USP, pelo apoio logístico

Aos demais integrantes do Laboratório de CADCAM, por conviverem comigo

A todos que, de uma forma ou outra, me ajudaram a concluir este trabalho

Ao CNPq, pela bolsa concedida

E, de uma forma especial, aos que esqueci de citar aqui

Por fim, agradeço:

À Clélia, minha esposa, por me entender e apoiar sempre

A Deus

ALMEIDA, Francisco José de. *Sistematização e Automação do Ambiente de Projeto: o Enfoque da Sintaxe*. São Carlos, SP. Novembro de 1997.

Para meus filhos, Juliana e Alexandre

SUMÁRIO

RESUMO.....	viii
ABSTRACT	viii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivo do Trabalho	3
1.2. Conteúdo do Trabalho.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1. Inteligência Artificial	8
2.1.1. Representação do Conhecimento.....	13
2.1.2. Mecanismos de Inferência	17
2.2. Projeto Conceitual.....	19
2.3. Computadores no Projeto Conceitual	25
2.4. Metodologia de Projeto Conceitual.....	36
2.5. Conclusão.....	49
3. PROPOSIÇÃO E VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA DE PROJETO CONCEITUAL.....	52
3.1. O Tema Escolhido	52
3.2. Metodologia de Projeto Conceitual Proposta.....	53
3.3. Implementação da Metodologia de Projeto Proposta: Sistema Inteligente de Projeto Auxiliado por Computador	61
3.3.1. Metodologia para desenvolvimento de Sistema Baseado em Conhecimento.....	65
3.3.2. Linguagem de programação.....	68
3.3.3. Bases de Conhecimento	72
3.3.4. Forma de Representação do Conhecimento e Mecanismo de Inferência.....	76
3.3.5. Lógica Difusa	82
3.3.6. Desenvolvimento do Sistema Inteligente de Projeto Auxiliado por Computador	84
3.4. Utilização do Sistema Inteligente de Projeto Auxiliado por Computador - Manual de Uso..	91
3.4.1. Requisitos de <i>software</i> e <i>hardware</i> para a execução do Sistema Inteligente de Projeto Auxiliado por Computador	91
3.4.2. Instalação do programa e ativação através do Windows	93
3.4.3. Aplicação da Metodologia de Projeto Conceitual Proposta	95
3.4.4. Gerenciamento da Base de Conhecimentos	115
3.4.5. Outros recursos do sistema.....	125

4. AVALIAÇÃO E CONCLUSÕES.....	129
4.1. Avaliação da Metodologia de Projeto Conceitual e do Sistema Baseado em Conhecimento	129
4.1.1. Avaliação da Metodologia de Projeto Conceitual.....	131
4.1.2. Avaliação do Sistema Inteligente de Projeto Auxiliado por Computador	134
4.1.3. Considerações finais	138
4.2. Conclusões	139
 BIBLIOGRAFIA CITADA	 141
 ANEXO 1 - VERBOS TÉCNICOS CADASTRADOS	 151
 ANEXO 2 - PRINCÍPIOS FÍSICOS CADASTRADOS	 174

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1. RELAÇÃO ENTRE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL, SISTEMAS ESPECIALISTAS E SISTEMAS BASEADOS EM CONHECIMENTO (RODRIGUES & MONARD, 1995:6).....	10
FIGURA 2.2. DIAGRAMA DE BLOCOS DE SISTEMA ESPECIALISTA (DURKIN, 1994:7)	11
FIGURA 2.3. EXEMPLO DE REDE SEMÂNTICA.....	14
FIGURA 2.4. EXEMPLO DE REGRAS DE PRODUÇÃO.....	15
FIGURA 2.5. EXEMPLO DE FRAMES E OBJETOS.....	16
FIGURA 2.6. USO DE FORWARD CHAINING E BACKWARD CHAINING (MOCKLER & DOLOGITE, 1992:297).....	18
FIGURA 2.7. FASES DO PROJETO (PAHL & BEITZ, 1992).....	20
FIGURA 2.8. FASES DO PROJETO (FIOD, 1993:P.88)	21
FIGURA 2.9. FASE DE PROJETO CONCEITUAL.....	21
FIGURA 2.10. INTERDISCIPLINARIEDADE DO PROJETO CONCEITUAL (NADIM & NOVAK, 1987: 149).....	22
FIGURA 2.11. INFLUÊNCIA DO PROJETO NO CUSTO DE MANUFATURA (ULMANN, 1992:8)	24
FIGURA 2.12. TRABALHO COM ICADSYSTEM (NADIM & NOVAK, 1987:160).....	25
FIGURA 2.13. FASES PRIMÁRIAS DE UM PROJETO (ASIMOW, 1968:23)	38
FIGURA 2.14. ESTUDO DE EXEQUÍBILIDADE (ASIMOW, 1968:32) (SIMPLIFICADO).....	39
FIGURA 2.15. FASES DO PROJETO (WOODSON, 1966:24-25).....	40
FIGURA 2.16. ESTRUTURA DO PROJETO. ESTUDO DE VIABILIDADE (WOODSON, 1966:26).....	40
FIGURA 2.17. O MODELO DE DESENVOLVIMENTO DA VDI 2221 (CROSS, 1996:30).....	42
FIGURA 2.18. FASES DO PROJETO CONCEITUAL (PAHL & BEITZ, 1992: 58).....	44
FIGURA 2.19. COMPARAÇÃO DE FUNÇÕES GERALMENTE VÁLIDAS (PAHL & BEITZ, 1992: 27)	45
FIGURA 2.20. METODOLOGIA DE PROJETO CONCEITUAL (FIOD, 1993: 93).....	46
FIGURA 2.21. MODELO SIMÉTRICO PROBLEMA/SOLUÇÃO (CROSS, 1996:46)	47
FIGURA 2.22. A FASE DE PROJETO CONCEITUAL (ULMANN, 1992: 141)	48
FIGURA 2.23. FUNÇÕES MECÂNICAS TÍPICAS DE PROJETO (ULMANN, 1992:145).....	49
FIGURA 3.1. FUNÇÃO GLOBAL.....	56
FIGURA 3.2. FUNÇÕES PARCIAIS.....	57
FIGURA 3.3. FUNÇÕES ELEMENTARES.....	58
FIGURA 3.4. PRINCÍPIOS FÍSICOS.....	58
FIGURA 3.5. COMPONENTES.....	60
FIGURA 3.6. APRESENTAÇÃO DO SISTEMA BASEADO EM CONHECIMENTO PROPOSTO ...	62
FIGURA 3.7. FASES DE DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS ESPECIALISTAS (DURKIN, 1994:40).....	66
FIGURA 3.8. LÓGICA DIFUSA PARA DEFINIR A CARACTERÍSTICA PESO (EXEMPLO).....	75
FIGURA 3.9. FORMA DE REPRESENTAÇÃO DO CONHECIMENTO UTILIZADO NO SISTEMA BASEADO EM CONHECIMENTO - FRAMES E REGRAS DE PRODUÇÃO	77
FIGURA 3.10. TIPOS DE PROBLEMAS SOLUCIONADOS POR SISTEMAS ESPECIALISTAS (DURKIN, 1994: 17).....	79
FIGURA 3.11. TIPO DE PROBLEMA VERSUS MECANISMO DE INFERÊNCIA E REPRESENTAÇÃO DO CONHECIMENTO (DURKIN, 1994: 628).....	79
FIGURA 3.12. REGRA PARA COMBINAÇÃO DE COMPONENTES.....	81
FIGURA 3.13. AÇÃO DO USUÁRIO SOBRE A SUGESTÃO DO SISTEMA COMPUTACIONAL... ..	82
FIGURA 3.14. OPÇÕES DO INSTALADOR DO PROGRAMA.....	93
FIGURA 3.15. ACESSO AO PROGRAMA ATRAVÉS DO WINDOWS 3.1/3.11.....	94
FIGURA 3.16. ACESSO AO PROGRAMA ATRAVÉS DO WINDOWS 95.....	94
FIGURA 3.17. TELA DE APRESENTAÇÃO DO SISTEMA INTELIGENTE DE PROJETO AUXILIADO POR COMPUTADOR.....	95
FIGURA 3.18. JANELA PRINCIPAL E JANELA DE AUXÍLIO <i>ON-LINE</i>	95
FIGURA 3.19. ACESSO AOS MÓDULOS DE DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	96
FIGURA 3.20. ESCOLHENDO UM VERBO QUE EXPRIMA A AÇÃO DESEJADA.....	97

FIGURA 3.21. REFINANDO A ESCOLHA DO VERBO DO PROJETO.....	98
FIGURA 3.22. PROCESSO DE ESCOLHA DO VERBO PARA O PROJETO FINALIZADO.....	99
FIGURA 3.23. ESCOLHENDO UM OBJETO PARA O PROJETO.....	100
FIGURA 3.24. VISÃO GERAL DA JANELA DE IDENTIFICAÇÃO DO OBJETO DO PROJETO..	101
FIGURA 3.25. ESCOLHENDO A CARACTERÍSTICA PARA A AÇÃO.....	102
FIGURA 3.26. VISÃO GERAL DA JANELA DE CARACTERIZAÇÃO DA AÇÃO DO PROJETO	103
FIGURA 3.27. ACESSO AOS MÓDULOS DE BUSCA DE SOLUÇÕES.....	104
FIGURA 3.28. FASE 1 - FUNÇÕES PARCIAIS.....	105
FIGURA 3.29. ESQUEMA DE FUNÇÕES PARCIAIS.....	106
FIGURA 3.30. FASE 2 - FUNÇÕES ELEMENTARES.....	108
FIGURA 3.31. IMAGEM DA SEQÜÊNCIA DE FUNÇÕES ELEMENTARES.....	109
FIGURA 3.32. FASE 3 - PRINCÍPIOS FÍSICOS.....	110
FIGURA 3.33. EXEMPLO DE MATRIZ MORFOLÓGICA GERADA PELO PROGRAMA.....	111
FIGURA 3.34. FASE 4 - COMPONENTES.....	113
FIGURA 3.35. FASE 5 - RECOMBINAÇÃO DE COMPONENTES.....	114
FIGURA 3.36. RECOMBINAÇÃO DE COMPONENTES GERANDO DUAS SOLUÇÕES.....	115
FIGURA 3.37. ACESSO AOS MÓDULOS DE GERENCIAMENTO.....	116
FIGURA 3.38. JANELA DE CADASTRO DE VERBOS (AÇÕES).....	116
FIGURA 3.39. JANELA DE CADASTRO DE CARACTERÍSTICAS DE AÇÕES (ADVERBIOS) ..	117
FIGURA 3.40. JANELA DE CADASTRO DE CARACTERÍSTICAS DE OBJETOS (ADJETIVOS)	118
FIGURA 3.41. JANELA DE CADASTRO DE OBJETOS (RECEPTORES DA AÇÃO).....	120
FIGURA 3.42. JANELA DE CADASTRO DE FUNÇÕES PARCIAIS.....	121
FIGURA 3.43. JANELA DE CADASTRO DE PRINCÍPIOS FÍSICOS.....	122
FIGURA 3.44. JANELA DE PESQUISA DE PRINCÍPIOS FÍSICOS.....	123
FIGURA 3.45. JANELA DE CADASTRO DE COMPONENTES (CATÁLOGO).....	124
FIGURA 3.46. JANELA DE PESQUISA DE COMPONENTES (CATÁLOGO).....	125
FIGURA 3.47. ACESSO AO MÓDULO DE LOCALIZAÇÃO DOS ARQUIVOS.....	126
FIGURA 3.48. JANELA DE LOCALIZAÇÃO DOS ARQUIVOS DE DADOS.....	126
FIGURA 3.49. ACESSO À SAÍDA DO PROGRAMA.....	127
FIGURA 3.50. ATIVAÇÃO/DESATIVAÇÃO DA BARRA DE FERRAMENTAS.....	127
FIGURA 4.1. CARACTERÍSTICAS PARA O OBJETO DO PROJETO.....	130
FIGURA 4.2. CARACTERÍSTICAS PARA AÇÃO DO PROJETO.....	130
FIGURA 4.3. SOLUÇÕES IDENTIFICADAS PARA O PROJETO.....	131
FIGURA 4.4. PRINCÍPIOS FÍSICOS IDENTIFICADOS.....	132
FIGURA 4.5. MANIPULAÇÃO DO ESQUEMA GRÁFICO DA SOLUÇÃO GERAL.....	135
FIGURA 4.6. CONHECIMENTO RELATIVO A PRINCÍPIOS FÍSICOS.....	136
FIGURA 4.7. CONHECIMENTO RELATIVO A COMPONENTES.....	136
FIGURA 4.8. JUSTIFICATIVAS PARA AS PROPOSIÇÕES DO PROGRAMA.....	137

RESUMO

Propõe uma Metodologia para Projeto Conceitual, cujos principais objetivos são a geração sistemática assistida de soluções para problemas de projeto com estímulo à criatividade do projetista, e a viabilidade de sua implementação no computador. Para tanto, revisam-se as áreas de Projeto Conceitual e de Metodologias de Projeto Conceitual, comprovando-se as vantagens da sistematização desta fase do projeto. Revisa-se também a área da Inteligência Artificial e sua subárea de Sistemas Baseados em Conhecimento, verificando-se ser esta a ferramenta necessária para a implementação da metodologia proposta num sistema computacional. Apresenta o Sistema Inteligente de Projeto Auxiliado por Computador desenvolvido, com um manual de uso. Termina por avaliar a metodologia e o sistema computacional propostos.

Palavras-chave: Projeto Conceitual, Metodologia de Projeto Conceitual, Sistema Inteligente de Projeto Auxiliado por Computador

ABSTRACT

It proposes a Conceptual Design Methodology, which main goals are the automatic generation of problem solutions, stimulating the designer creativity, and its applicability in a computer aided design system. In this way, it is reviewed the areas of Conceptual Design and Conceptual Design Methodologies, aiming to corroborate the advantages of the systematization of this design phase. It is also reviewed the area of Artificial Intelligence and its subarea of Knowledge-Based Systems, verifying to be this tools the necessary to the implementation of the proposed Conceptual Design Methodology into a computational system. It presents the Intelligent Computer Aided Design System developed, with a user's manual. It ends with the avaluation of both the proposed methodology and the developed computational system.

Keywords: Conceptual Design, Conceptual Design Methodology, Intelligent Computer Aided Design

1. Introdução

No mundo atual, o projeto mecânico exige sua própria otimização, seja devido à necessidade de se atingir ou manter a competitividade mundial de um produto, seja para se gerar produtos melhores, seja para uma vida humana melhor.

Muito desta otimização do projeto mecânico deve-se ao desenvolvimento da ciência da computação. O uso de computadores tem crescido de maneira substancial desde seu surgimento, abrangendo cada vez mais novas áreas de atuação. Com o advento dos microcomputadores, este crescimento sofreu um impulso significativo. Atualmente, vê-se seu uso cada vez mais disseminado, incorporando-se à vida diária das pessoas. Esta realidade, se válida para áreas fora da engenharia, muito mais validade tem apresentado dentro da mesma.

Outro tanto, porém, deve-se ao desenvolvimento da filosofia de projeto, do trabalho de criação humano. Se lembrarmos da divisão do projeto mecânico, dada por SHIGLEY (1984:2), e relacionada à computação por GROOVER & ZIMMERS (1984:58), pode-se dizer que competirão ao homem as etapas de reconhecimento das necessidades e definição do problema, ligadas ao raciocínio e, ainda, à intuição humana, enquanto ao computador competirá o auxílio ao homem nas etapas de síntese, análise e otimização e apresentação escrita ou gráfica da solução do projeto.

Esta distribuição de funções está diretamente relacionada com as características de cada uma das partes: a flexibilidade e inteligência humana e a rapidez, facilidade de tratar com grande número de dados e repetibilidade do computador (IIDA, 1990:30). Assim, tem-se já grande desenvolvimento

computacional na área de cálculos de verificações, de computação gráfica e de simulação.

Este panorama, porém, tem mudado, principalmente a partir da década de 1980. O fato responsável por esta mudança foi a aplicabilidade comercial alcançada pela Inteligência Artificial (artificial intelligence), inicialmente na área de Sistemas Baseados em Conhecimento (knowledge-based systems), na subárea dos Sistemas Especialistas (knowledge-based expert systems). Segundo SMITH (1988:9)

"One area of AI research which is quite advanced (...) is that of expert systems. Indeed, expert systems is one of the few areas of AI which has moved out of the research laboratory and into the real world and is beginning to realise its potential in industrial and commercial applications."

Dentro deste ambiente, insere-se o presente trabalho. A necessidade de automatização das fases de fabricação de um produto é atualmente inadiável. Esta automatização, que se iniciou com as máquinas a comando numérico, passando pelos sistemas informatizados de controle e planejamento de produção e de desenho auxiliado por computador, através da Inteligência Artificial vem chegando à primeira e menos metodizada fase do projeto, a fase de projeto conceitual.

Com a automatização desta fase do projeto, permite-se integrar, através do computador, todas as fases do projeto, já citadas, entre si e, em seguida, integrar-se o projeto à fabricação. Com esta integração, conceitos como Engenharia Simultânea e Reengenharia tem sua implementação bastante facilitada, permitindo-se atingir a otimização desejada de todo o processo.

Com a aplicação dos princípios da Inteligência Artificial, passa a ser viável o desenvolvimento de sistemas computacionais para o projeto conceitual, desde que hajam metodologias de processo passíveis de serem informatizadas.

1.1. Objetivo do Trabalho

O objetivo principal deste trabalho é a proposição de uma Metodologia de Projeto Conceitual com as seguintes características:

- a) que metodize o processo de Projeto Conceitual, quebrando a relação direta entre a qualidade da solução e a inspiração humana, sem, contudo, desprezar a criatividade e inventividade;
- b) que facilite a aplicação de soluções conhecidas, agilizando e otimizando o processo de Projeto Conceitual;
- c) que reduza a carga de trabalho humano, economizando tempo, prevenindo erros humanos e mantendo o interesse, aumentando a produtividade;
- d) que seja de fácil ensino e fácil aprendizagem, visando a facilidade de implementação e treinamento;
- e) que seja passível de implementação no computador, para permitir a integração com as demais fases do projeto, e
- f) que estimule a criatividade e inventividade.

Estas especificações serão discutidas no corpo deste trabalho, visando justificar a aplicabilidade de cada uma delas para o desenvolvimento de uma Metodologia de Projeto Conceitual.

É também objetivo deste trabalho desenvolver um Sistema Inteligente de Projeto Auxiliado por Computador, que comprove a aplicabilidade da Metodologia de Projeto Conceitual proposta.

1.2. Conteúdo do Trabalho

O trabalho conterà três partes: a) uma parte introdutória, composta da revisão bibliográfica, onde se apresentarão os conceitos básicos para o desenvolvimento do Sistema Baseado em Conhecimento; os conceitos básicos citados referem-se apenas aos conceitos ligados à Inteligência

Artificial e ao Projeto Conceitual (conceptual design) ; b) uma parte de desenvolvimento da Metodologia de Projeto Conceitual proposta e de apresentação do Sistema Baseado em Conhecimento desenvolvido e; c) uma parte de avaliação do presente trabalho e principais conclusões.

Da primeira parte comporão os seguintes capítulos:

Inteligência Artificial

Neste capítulo serão apresentas a definição e a aplicabilidade da Inteligência Artificial, relacionando-a ao Projeto Conceitual. Dentro da área de Inteligência Artificial, serão definidos os Sistemas Baseados em Conhecimento e os Sistemas Especialistas. Uma vez que estes devem apresentar basicamente dois módulos, um onde se represente o conhecimento envolvido e outro que modele o raciocínio empregado, será feita breve apresentação das formas mais usuais de Representação de Conhecimento e dos mais comuns Mecanismos de Inferência. Vantagens, desvantagens e aplicabilidade destas formas são discutidas.

Projeto Conceitual

Neste capítulo serão apresentados os conceitos relativos ao projeto mecânico, à fase de Projeto Conceitual, os relacionamentos destes com as demais fases do projeto e a inserção da Inteligência Artificial nesta área. Através da definição das ações que o Projeto Conceitual envolve, será demonstrada a necessidade do uso da Inteligência Artificial para a implementação de sistemas computacionais para esta fase do projeto. Estes sistemas computacionais são denominados Sistemas Inteligentes de Projeto Auxiliado por Computador, classificados dentro do grupo dos Sistemas Baseados em Conhecimento.

Computadores no Projeto Conceitual

Neste capítulo são revisados os principais trabalhos relacionados à aplicabilidade do computador no projeto conceitual, nos últimos anos. Com base neste levantamento, são identificadas tendências e verificam-se as principais características que os sistemas computacionais revisados apresentam. Estas tendências e características apresentadas serão consideradas quando da apresentação do Sistema Inteligente de Projeto Auxiliado por Computador desenvolvido neste atual trabalho.

Metodologias de Projeto Conceitual

Fechando esta parte do trabalho, serão apresentadas as Metodologias de Projeto Conceitual consideradas mais importantes, traçando-se um paralelo entre elas, e concluindo-se pela vantagem da sistematização do processo de Projeto Conceitual. As conclusões retiradas destas comparações, em forma de requisitos a serem satisfeitos por uma Metodologia de Projeto Conceitual, serão considerados quando da proposição da particular metodologia referente a este trabalho.

Da segunda parte comporão os seguintes capítulos:

Metodologia de Projeto Conceitual proposta

Este capítulo contém a apresentação da Metodologia de Projeto Conceitual proposta, com suas fases e procedimentos internos, e as justificativas para a proposição desta metodologia.

Desenvolvimento do Sistema Baseado em Conhecimento

Neste capítulo, apresentam-se as definições básicas quanto ao desenvolvimento do Sistema Baseado em Conhecimento, tais como a plataforma de *hardware* e de *software*, apresentação das linguagens e *shells* disponíveis, a linguagem utilizada, o planejamento efetuado e o desenvolvimento em si do Sistema Baseado em Conhecimento, com sua respectiva implementação e testes. A metodologia a ser utilizada no desenvolvimento do Sistema Baseado em Conhecimento é a sugerida por DURKIN (1994). A maior parte do assunto deste capítulo é de desenvolvimento pessoal, apresentando-se apoio de referências quando necessário. A abrangência do Sistema Baseado em Conhecimento, ou seja, a sua área de atuação, é definida em função da abrangência da sua base de conhecimentos.

Apresentação do Sistema Baseado em Conhecimento

Apresentar-se-á o uso do sistema, com exemplos. A confecção deste capítulo é de desenvolvimento pessoal, com poucas referências externas. Deste capítulo constará um manual de uso do Sistema Inteligente de Projeto Auxiliado por Computador desenvolvido.

A terceira e última parte do trabalho conterà os capítulos:

Avaliação do Sistema Baseado em Conhecimento

Apresenta-se uma avaliação da Metodologia de Projeto Conceitual proposta e do Sistema Inteligente de Projeto Auxiliado por Computador desenvolvido. Esta avaliação é feita com base em execução do programa para um problema específico. O conteúdo deste capítulo está diretamente relacionado com a abrangência do sistema.

Conclusões

As principais conclusões acerca deste trabalho são apresentadas neste capítulo final. Também são apresentadas propostas para a continuidade deste trabalho, com novos melhoramentos a serem implementados ou novos temas relacionados a este.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Inteligência Artificial

Uma das mais conhecidas e famosas definições da Inteligência Artificial, ainda hoje bastante citada e aceita, é a formulada por RICH, que a define como

"... the study of how to make computers do things at which, at the moment, people are better." (RICH, 1983:1)

Esta ciência tomou grande impulso com o anúncio feito pelos Japoneses, em 1981, do seu projeto de quinta geração de computadores. Esta nova geração de computadores trazia em si uma revolução do entendimento do mesmo até então. Nas palavras de SMITH (1988:16):

"The philosophy behind the fifth generation computer is that the user will be able to communicate with the machine in natural language and that the computer will contain sufficient knowledge to be able to understand and solve his problem. The fifth generation computer will thus be a highly sophisticated and powerfull knowledge processing and problem solving machine consisting of a vast knowledge base, a powerfull inference engine and an extremely friendly and intelligent user-interface system."

O mesmo SMITH (1988:17) conclui:

"Basically what the Japanese are attempting to produce is a system which resembles, as closely as possible, a human being in its intelligence and knowledge. However, the system will be more powerfull in its problem solving capabilities than any human being could ever hope to be. The system will also be extremely easy to use - ideally the user will be able to speak his problem to the computer in his own native tongue."

Em resposta à proposta japonesa, anunciou-se em 1983 o ALVEY programme of advanced Information Technology (IT). Este programa com previsão de duração de cinco anos, uma *joint venture* entre o Governo Britânico, a indústria e as universidades Britânicas, tinha como primeiro objetivo o desenvolvimento da indústria Britânica da Tecnologia da Informação através de um programa de projetos em colaboração (SMITH, 1988:17-18).

Segundo o mesmo autor, este programa englobava um projeto demonstrativo de larga escala para o

"... development of a "design support system" which will be used to aid designers throughout all stages of product development, from initial design through to manufacture." (SMITH, 1988:19).

Com base no exposto até aqui, pode-se introduzir outra definição de Inteligência Artificial, mais moderna e, talvez, mais específica:

"Artificial Intelligence is the study of the computations that make it possible to perceive, reason, and act." (WINSTON, 1993:5)

Esta última definição tem a capacidade de se adaptar melhor aos objetivos dos programas que iniciaram a pesquisa em maior escala na área da Inteligência Artificial. A definição de RICH (1983), por seu turno, tem a capacidade de apresentar uma generalidade muito importante em área tão ativa. Esta visão é apoiada por PARTRIDGE (1991).

As áreas de atuação da Inteligência Artificial, segundo BARR & FEIGENBAUM (1981:7-10) são a solução de problemas (problem solving), onde se incluem os jogos (playing games), o raciocínio lógico (logical reasoning), onde se incluem as provas de teoremas (theorem proving), entendimento de linguagem natural (natural language understanding), aprendizagem (learning), *expertise* ou engenharia de conhecimento (knowledge engineering) e robótica e visão (robotics and vision).

Focalizando os Sistemas Baseados em Conhecimento, abrangidos pela engenharia de conhecimento, estes subentendem uma

capacidade de raciocínio do computador, uma adaptabilidade do mesmo frente a situações não totalmente previstas, que podem ser resolvidas através do aprendizado da máquina com suas experiências anteriores. Para se atingir tais objetivos, exige-se a transferência dos conhecimentos e das regras de relacionamento destes conhecimentos, correspondentes à área de conhecimento, para o computador. (SMITH, 1988:10). Os Sistemas Baseados em Conhecimento diferem dos sistemas convencionais na forma em que são organizados, na maneira como incorporam o conhecimento, na forma que manipulam este conhecimento e na impressão que eles causam no usuário com quem interagem (SAWAKI et al, 1994:1).

Estreitando-se ainda mais a definição, e abrangência, quando estes sistemas tratam com um domínio muito restrito e com alto grau de especialização em relação ao conhecimento envolvido, definem-se os Sistemas Especialistas (RODRIGUES & MONARD, 1995:6) (figura 2.1).

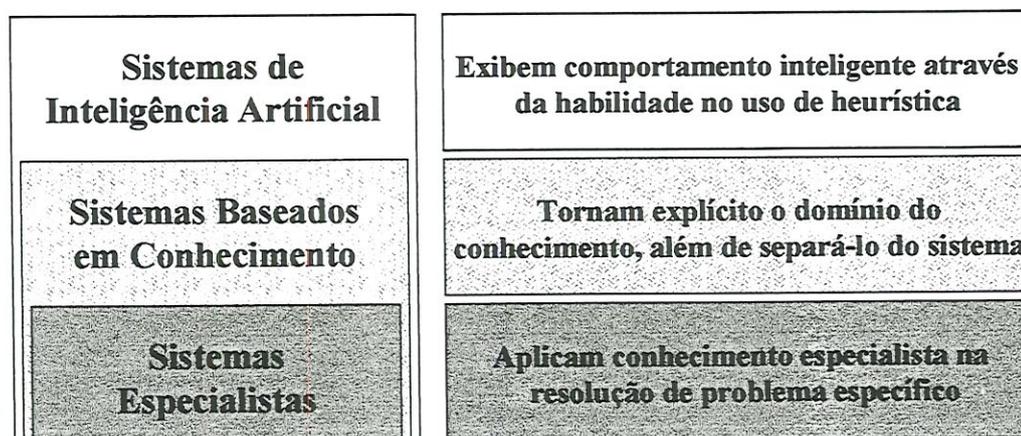


FIGURA 2.1. RELAÇÃO ENTRE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL, SISTEMAS ESPECIALISTAS E SISTEMAS BASEADOS EM CONHECIMENTO (RODRIGUES & MONARD, 1995:6)

Estes sistemas possuem um conhecimento especializado em alguma área de conhecimento, apresentando, portanto, duas características particulares: a) são aplicáveis a um escopo bastante limitado, e b) contém conhecimento aprofundado sobre um determinado assunto, a nível de um

especialista. Segundo DURKIN (1994), são aplicações de Sistemas Especialistas a substituição do especialista humano, em locais onde ele não pode permanecer ou para disponibilizar a capacidade de *expert* em vários locais ao mesmo tempo, ou o auxílio ao especialista, servindo como uma fonte de informações, uma memória auxiliar, onde o *expert* vai buscar conhecimento específico.

Sistemas Especialistas buscam modelar duas principais capacidades do especialistas, quais sejam o conhecimento especializado que ele retém e a seqüência de raciocínio que ele utiliza na resolução de problemas específicos. Na modelagem destas capacidades humanas, o Sistema Especialista apresenta dois principais módulos, a Base de Conhecimentos e o Mecanismo de Inferência (DURKIN, 1994: 7) (figura 2.2).

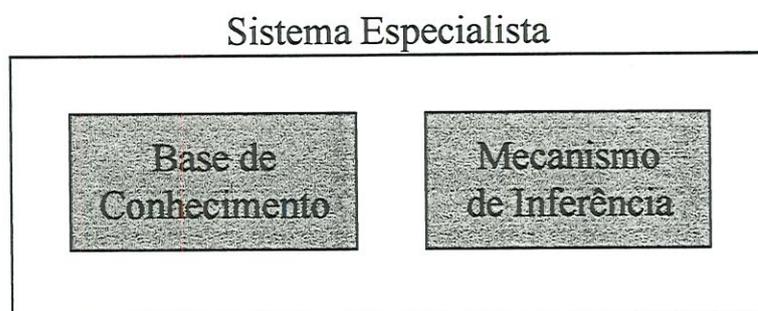


FIGURA 2.2. DIAGRAMA DE BLOCOS DE SISTEMA ESPECIALISTA (DURKIN, 1994:7)

A Base de Conhecimento contém o conhecimento altamente especializado sobre o problema ou área de atuação. Este conhecimento deve ser provido pelo especialista. Ponto crucial deste módulo é a forma de representação deste conhecimento. O Mecanismo de Inferência, por sua vez, tenta reproduzir a maneira com que o especialista raciocina sobre o problema ou área de atuação específica. Para tanto, é necessário estudar-se como o especialista “*pensa*” sobre o problema, para se captar o seu raciocínio e, então, transferi-lo para o Sistema Especialista. Ponto crucial deste módulo é a

escolha do mecanismo de raciocínio, ou de Mecanismo de Inferência, a ser implementado no sistema computacional.

Sistemas Especialistas aplicados a várias áreas de conhecimento são citados por WATERMAN (1986:244-298), porém nenhum no projeto. RICH (1983:3), porém, cita especificamente o projeto de engenharia (engineering design) como uma aplicação da engenharia do conhecimento.

No caso do projeto mecânico, a Inteligência Artificial (mais especificamente Sistemas Baseados em Conhecimento) é a ferramenta que permite a aplicação do computador na etapa de definição do problema e um maior aprofundamento do uso do mesmo nas etapas de síntese e de análise e otimização do projeto. (KLEIN, 1992:149). A mesma idéia é defendida por MARTINS et al (1989:525), que dizem:

"A inteligência artificial e o seu segmento denominado sistemas especialistas constituem-se em instrumentos (...) (que) possibilitam o modelamento do processo de raciocínio empregado pelos especialistas e a representação simbólica adequada dos conceitos e relações do domínio do problema."

Assim, a partir principalmente de 1987, surgem vários trabalhos relacionando a Inteligência Artificial com a definição do problema de projeto mecânico, indicando para o tal encaminhamento do problema. (ver anais de Design Theory and Methodology dos anos de 1989, 1990, 1991 e 1992). Tais trabalhos sugerem alguns parâmetros norteadores para se inserir nesta área de conhecimento, sem contudo exaurir o campo de pesquisa. Na verdade, verifica-se o apalpar iniciante nesta área do saber. A existência destes trabalhos, portanto, não desmerece esta proposta, haja visto que os próprios autores dos referidos trabalhos consideram a área em franco desenvolvimento.

Buscando realçar a importância dos Sistemas Especialistas, é pertinente citar novamente RICH (1983:5), que apresenta uma conclusão muito interessante sobre a Inteligência Artificial:

"One of the few hard and fast results to come out of the first 20 years of A.I. research is that intelligence requires knowledge."

Para finalizar, podemos citar uma visão interessante das vantagens da Inteligência Artificial, especificamente relacionada à engenharia de conhecimento que é dada por WATERMAN (1986:vi):

"As an inevitable side effect, knowledge engineering will catalyze a global effort to collect, codify, exchange, and exploit applicable forms of human knowledge. In this way, knowkedge engineering will accelerate the development, clarification, and expansion of human knowledge itself."

2.1.1. Representação do Conhecimento

Não se objetiva aqui esgotar o assunto de como representar o conhecimento nem de métodos de raciocínio, ou de inferência. Nem ao menos se busca aprofundar-se nestes temas. A idéia que deve ser entendida como razão de este trabalho conter esta sucinta seção é possibilitar ao leitor um pequeno painel das maneiras mais corriqueiras de Representação de Conhecimento e de Mecanismos de Inferência, visando o melhor entendimento do Sistema Inteligente de Projeto Auxiliado por Computador, proposto em capítulo posterior.

A escolha da forma de representar o conhecimento dentro de um Sistema Baseado em Conhecimento tem vital influência na qualidade final do sistema, pois como já citado por RICH (1983), a qualidade do conhecimento contido num Sistema Especialista define diretamente a qualidade geral do sistema. Em outras palavras, um sistema pobre em conhecimentos ou com conhecimentos incorretos só irá gerar soluções pobres ou incorretas.

O surgimento ou definição de uma nova forma de Representação de Conhecimento, qualquer que seja ela, sempre é oriunda de um enfoque sobre a maneira como o ser humano representa o conhecimento em sua mente, sendo uma tentativa de sistematizar este enfoque. Cada idealizador de uma forma de Representação de Conhecimento acredita ser aquela a maneira que mais se aproxima de como o cérebro humano efetivamente retém o conhecimento. Outros autores, porém, defendem a idéia de que a mente humana utiliza várias, ou todas, dessas maneiras para expressar seu

conhecimento, sendo que este é um fatos que explica a incrível complexidade do raciocínio humano e sua conseqüente dificuldade em ser transferido com eficiência para o computador.

As formas mais comumente utilizadas para representar o conhecimento são:

a) Redes Semânticas (MOCKLER & DOLOGITE, 1992:274,277)

Redes Semânticas são formas de Representação de Conhecimento poderosas, que realçam o relacionamento entre os fatos ou objetos. Uma Rede Semântica é composta de nós, que representam os objetos, conceitos ou situações, interligados por setas ou linhas que representam o relacionamento entre os nós (figura 2.3). Segundo vários autores da área da Inteligência Artificial, esta forma de Representação de Conhecimento é bastante similar à adotada pelo cérebro humano.

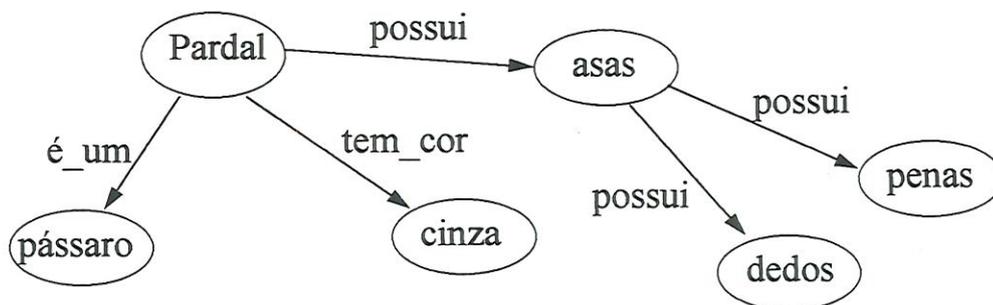


FIGURA 2.3. EXEMPLO DE REDE SEMÂNTICA

Uma grande vantagem desta forma de Representação de Conhecimento é sua compacticidade, podendo-se representar conhecimentos bastante complexos numa maneira reduzida. Através de Redes Semânticas pode-se representar relacionamento entre causa-efeito, hereditariedade e, inclusive, exceções.

b) Regras de Produção (MOCKLER & DOLOGITE, 1992:284)

São sentenças do tipo SE-ENTÃO (figura 2.4) baseadas na idéia geral de pares condição-ação. É uma das formas mais corriqueiras e simples de Representação de Conhecimento em Sistemas Baseados em Conhecimentos.

SE grama = alta E tempo = bom E habilidade = sim
ENTÃO recomendação = cortar_a_grama
SENÃO recomendação = não_cortar_a_grama

FIGURA 2.4. EXEMPLO DE REGRAS DE PRODUÇÃO

c) Cálculo de Predicado (MOCKLER & DOLOGITE, 1992:286)

Cálculo de Predicado associado a Modus Ponens é utilizado para derivar conhecimento novo a partir de conhecimentos previamente existentes, através da dedução matemática (GINSBERG, 1993:126). Juntamente com Lógica de Primeira Ordem, uma extensão sua que utiliza quantificadores (HOGGER, 1990:20), são as duas lógicas matemáticas mais comumente usadas. São baseadas na veracidade ou não das sentenças. O Cálculo de Predicados usa regras de inferência e prova por negação para a inferência. Operadores lógicos, tais como “e”, “ou” e “não” podem ser utilizados para ampliar o seu escopo.

Suas vantagens são sua precisão (resposta em termos de “verdadeiro” ou “falso”) e sua modularidade, e a conseqüente facilidade de adição, exclusão e alteração de sentenças independentemente das demais.

Apresenta, porém, também algumas desvantagens tais como a impossibilidade de representar incertezas e a ineficiência de seu processamento para um número grande de fatos representados. Com base neste fatos, o Cálculo de Predicados é aplicável para problemas de escopo limitado e bem definidos, como, por exemplo, diagnósticos.

d) Objetos e Frames (MOCKLER & DOLOGITE, 1992:288)

Objetos são quaisquer entidades representadas numa base de conhecimentos, enquanto Frames compõem a estrutura onde estes Objetos são armazenados. Um Frame pode conter uma série de informações de um Objeto, como demonstra a figura 2.5. Sua principal característica, e também vantagem, é que este tipo de Representação de Conhecimento trás automaticamente em seu bojo a possibilidade de se definir hereditariedade entre Objetos.

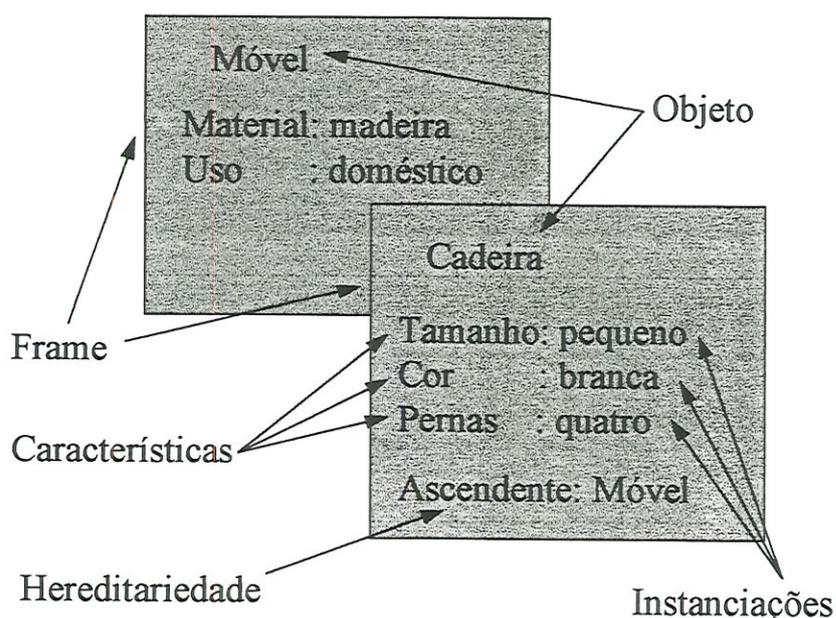


FIGURA 2.5. EXEMPLO DE FRAMES E OBJETOS

Desta forma, Frames são melhor aplicáveis em situações onde o conhecimento e relações entre estes são bem definidos e onde há uma hierarquia intrínseca no conhecimento envolvido.

Frames podem conter Regras de Produção internas, sendo de execução eficiente na busca de soluções. Este fato é comprovado pela grande quantidade de sistemas orientados a objetos que tem surgido nos últimos anos. Sua principal desvantagem é a sensibilidade do seu desempenho com base na qualidade da organização da estrutura de conhecimentos adotada.

e) Redes Neurais (MOCKLER & DOLOGITE, 1992:293,664-665)

Redes Neurais são programas treináveis ou ensináveis que pode ser usados para induzir ou extrair um padrão de informação. São especialmente úteis em situações onde os dados são muitos e as relações entre eles são freqüentemente nebulosas ou não explícitas. Uma Rede Neural pode reconhecer padrões numa base de conhecimentos de maneira similar ao procedimento seguido pelo cérebro humano. Devido a esta sua característica, Redes Neurais são largamente utilizadas em sistema de reconhecimento de padrões como, por exemplo, reconhecimento de linguagem ou de formas, inclusive linguagem escrita.

2.1.2. Mecanismos de Inferência

Mecanismo de Inferência é a maneira como o Sistema Especialista infere, ou raciocina, sobre a base de conhecimentos disponível. Os dois métodos mais usuais de implementação de Mecanismos de Inferência em Sistemas Baseados em Conhecimento são o Backward Chaining e o Forward Chaining. Neste trabalho nos ateremos a estes dois métodos por serem eles os mais usuais, como já citado, e, por isso mesmo, serem os maiores candidatos ao uso no sistema computacional a ser proposto.

O Backward Chaining (MOCKLER & DOLOGITE, 1992:295) inicia-se com o objetivo ou hipótese do problema, e progride em direção aos

fatos ou evidências. Num sistema baseado em Regras de Produção, este método é ativado pelo objetivo (parte ENTÃO da regra) a ser alcançado. Devido a isto ele é denominado “goal-driven”. O Mecanismo de Inferência baseado em Backward Chaining impede que regras desnecessárias para a prova de uma regra específica sejam ativadas, apesar de não impedir a possibilidade de se tentar provar regras que não podem ser provadas, por falta de causas disponíveis. Porém, uma desvantagem é que à medida que a quantidade de subobjetivos e regras aumenta, o sistema pode ser tornar muito extenso e diminuir o desempenho computacional. Backward Chaining é o Mecanismo de Inferência mais comumente encontrado em *shells*, sendo mais aplicável para sistemas onde a quantidade de dados seja maior que a quantidade de hipóteses (figura 2.6).

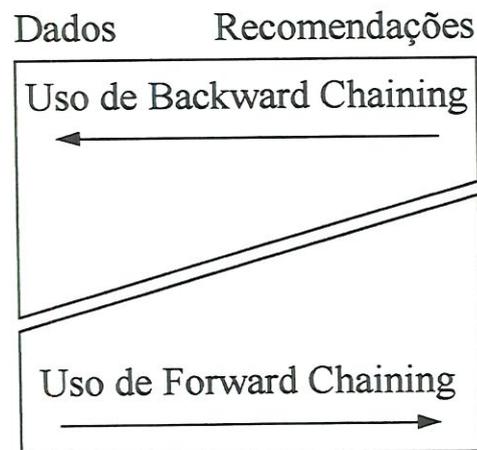


FIGURA 2.6. USO DE FORWARD CHAINING E BACKWARD CHAINING
(MOCKLER & DOLOGITE, 1992:297)

O Forward Chaining (MOCKLER & DOLOGITE, 1992:296) inicia-se com as condições iniciais do problema e então busca adiante através da base de conhecimentos, até uma solução. Num sistema baseado em Regras de Produção, por exemplo, o Mecanismo de Inferência inicia com o fato, examina a cláusula SE, e então busca a solução em direção ao objetivo. Este

método trabalha partindo dos fatos em direção às conclusões, sendo denominado "data-driven" ou "event-driven". Conforme a figura 2.6, ele é mais aplicável para problemas onde a quantidade de dados seja pequena em relação à quantidade de objetivos.

Como palavra final, gostaríamos de novamente realçar o objetivo desta seção, sublinhando que maiores e mais aprofundadas discussões a respeito destes assuntos podem ser encontradas em outros trabalhos da área da Inteligência Artificial, citados na bibliografia, tais como BARR & FEIGENBAUM (1991), DURKIN (1994), GINSBERG (1993), LUCAS & GAAG (1991), PARTRIDGE (1991), RICH (1983), RUSSEL & NORVIG (1995), STERLING & SHAPIRO (1986), WATERMAN (1986) e WINSTON (1993).

2.2. Projeto Conceitual

Área específica da engenharia mecânica, a engenharia do produto cuida do processo de projeto (design process), que pode ser definido, segundo WELCH & DIXON (1992:11) como

"a transformation between different states of information or knowledge (..) is therefore a series of transformations that solve a design problem by moving from a initial known state of knowledge to a final desired state of knowledge".

Segundo PAHL & BEITZ (1992:40), HUNDAL (1990:243), VDI 2221 (1987) citada por HUNDAL & LANGHOLTZ (1992:2) o processo de projeto pode ser dividido nas seguintes quatro etapas: a) clarificação das necessidades (clarification of the tasks); b) projeto conceitual (conceptual design); c) projeto preliminar (embodiment design); e d) projeto detalhado (detail design) (figura 2.7). A atuação de computadores progride dentro do processo de projeto no sentido inverso das fases deste (KLEIN, 1992:149).

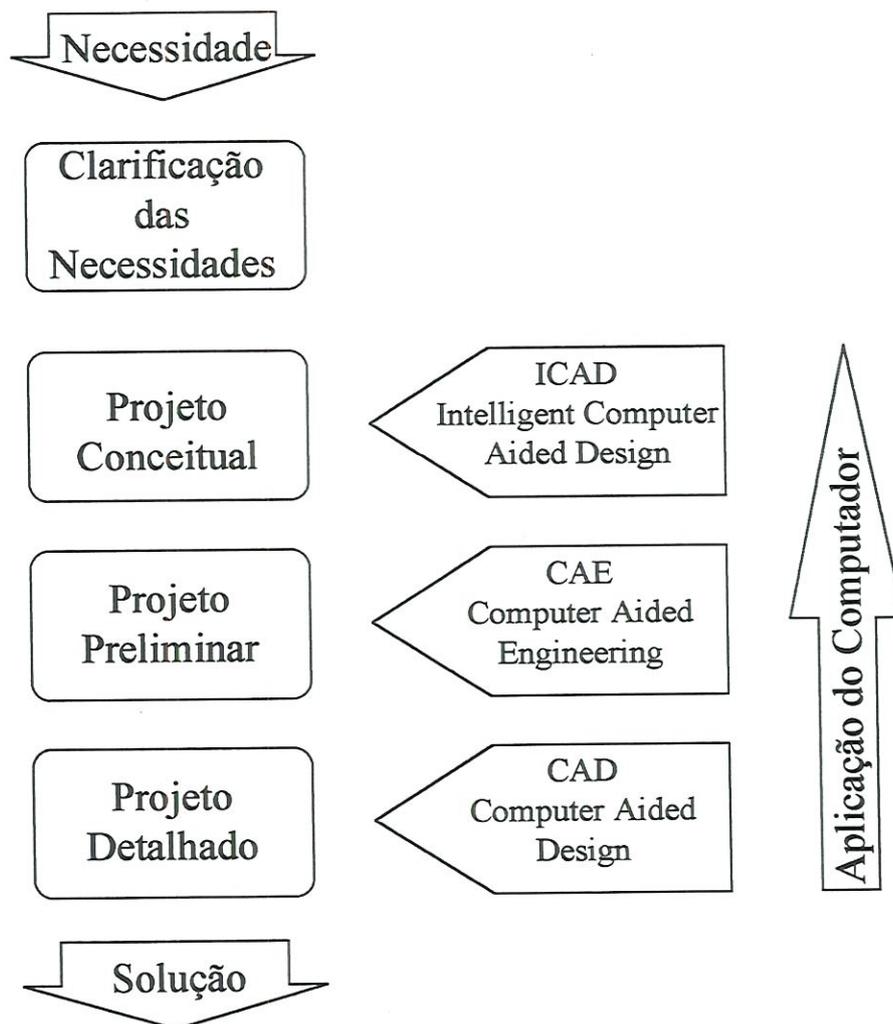


FIGURA 2.7. FASES DO PROJETO (PAHL & BEITZ, 1992)

Numa visão similar, segundo FIOD (1993), o processo de projeto engloba as fases de: a) planejamento; b) concepção; c) projeto preliminar, e d) projeto detalhado (figura 2.8). A primeira fase, Planejamento, envolve as atividades de estudo da seqüência a ser obedecida no processo de projeto. Como o autor cita, sempre deve-se planejar um trabalho antes de iniciar sua execução, afim de se poder controlar o encaminhamento dentro do processo, corrigindo possíveis desvios de rota, e verificando-se o sucesso do mesmo ao seu final. A fase de Concepção é reservada para a especificação exata da necessidade e para a obtenção sistemática de possíveis soluções para a necessidade levantada. As demais fases envolvem a escolha e geração de

uma solução técnica e o detalhamento desta até a geração de desenhos para a fabricação.

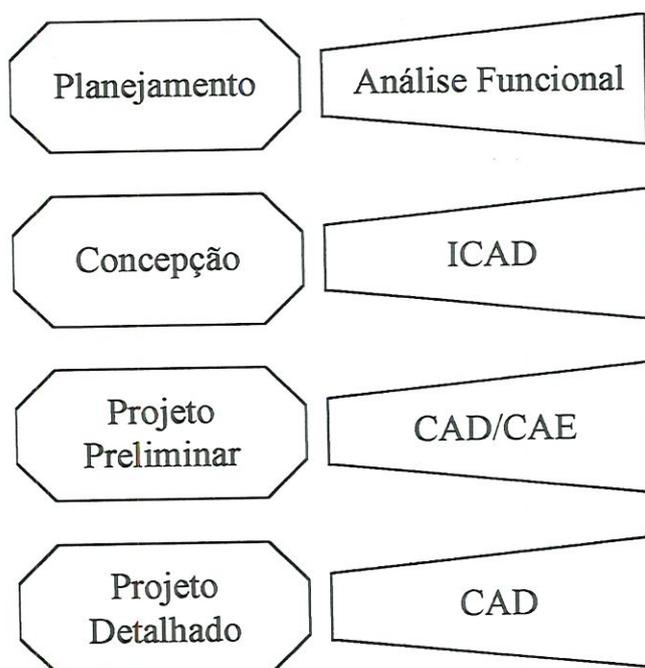


FIGURA 2.8. FASES DO PROJETO (FIOD, 1993:P.88)

Especificamente, a etapa do Projeto Conceitual (conceptual design) pode ser definida como:

"The conceptual process "begins" with questions and "ends" with detailed specifications usable by current systematic synthesis techniques." O'SHAUGHNESSY & STURGES (1992:283) (figura 2.9)

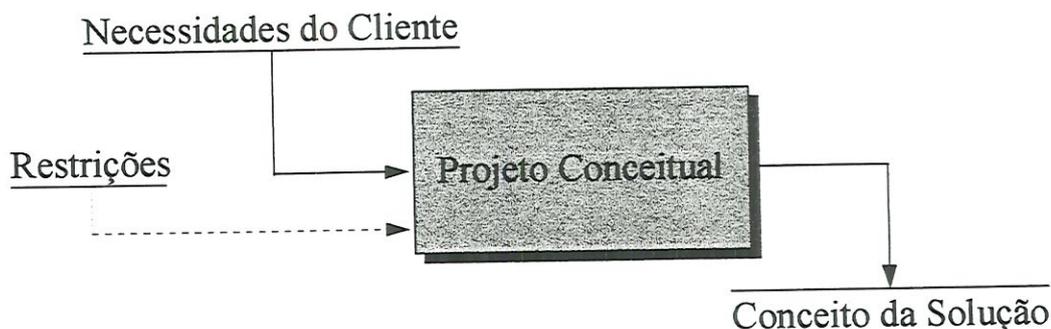


FIGURA 2.9. FASE DE PROJETO CONCEITUAL

Outra definição bem parecida pode ser encontrada em WELCH & DIXON (1992:11):

"... is the initial and most abstract stage of the design process starting with required functions (what the design is to do without saying how the design is to do it) and resulting in concepts (preliminary system configurations)."

Como apresentado nestas definições, esta fase exige grande capacidade inventiva e adaptiva do projetista, motivo pelo qual é a última etapa onde chega o computador.

Este processo é eminentemente criativo, além de exigir do projetista/engenheiro o conhecimento de várias disciplinas diferentes, tais como as de Tecnologia, de Ciências, de Psicologia, de Estética, de Sociologia, de História e de Planejamento (NADIN & NOVAK, 1987:149) (figura 2.10).

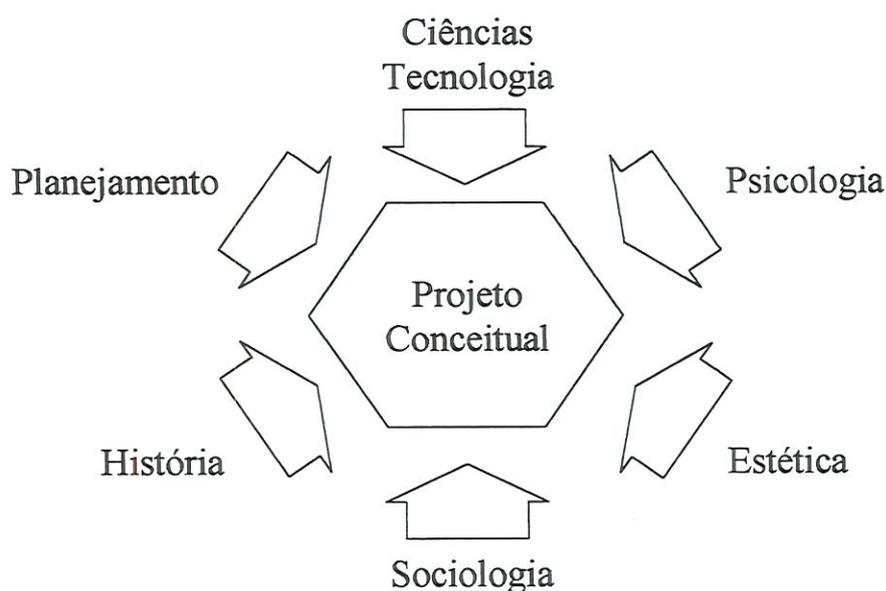


FIGURA 2.10. INTERDISCIPLINARIEDADE DO PROJETO CONCEITUAL
(NADIM & NOVAK, 1987: 149)

Assim, o Projeto Conceitual pode ser visto como a conjunção de criatividade e desmetodização, envolvendo várias linhas de raciocínio e uma grande quantidade de informações interdisciplinares. Desta forma, é visível a grande complexidade desta fase do processo de projeto e a sua interdisciplinariedade.

No Projeto Conceitual, manipula-se e trata-se com informações dispersas, muitas oriundas do raciocínio do próprio projetista e, portanto, não formalizadas (DURKIN, 1994). Devido a estes fatos, há a necessidade de vasto uso de criatividade por parte do projetista, o que, em conclusão, significa que há grande influência desta capacidade criadora na qualidade final do projeto. Além disso, pode-se constatar serem necessários dois tipos de conhecimento pelo projetista: o conhecimento das soluções técnicas (como fazer); e o conhecimento do processo de projeto (como proceder). Assim, durante a concepção, o projetista utiliza toda sua capacidade intelectual e diversificação de conhecimentos que possui, lançando mão constantemente de sua experiência pessoal e criatividade.

Nesta fase lança-se mão da abstração - ou a colocação do problema em termos genéricos, representados por um ou mais verbos, representando a ação desejada, e um substantivo, representando o objeto da ação - o que permite que se vislumbrem outros pontos de vista e outras soluções, e que se tenha uma visão mais global do problema; permitindo-se vislumbrar outras soluções para o problema. PAHL & BEITZ (1992) colocam este tema em termos de "generalização", afirmando ser preciso expressar o problema a ser resolvido em forma de uma solução neutra.

As vantagens da sistematização, segundo a VDI 2221 (1987) são: poderão ser obtidos e examinados mais encadeamentos de soluções parciais; poderão ser analisadas mais variantes de soluções; e obter-se-ão mais modelos e protótipos.

Estas constatações vem justificar a necessidade do Sistema Baseado em Conhecimento em desenvolvimento, pois este propõe-se a organizar e disponibilizar as informações ao projetista, concorrendo para

sistematizar o processo de Projeto Conceitual, minimizando, sem contudo liberar, a influência da maior ou menor capacidade de criatividade na qualidade apresentada pelo projeto.

Na prática, todos os passos envolvidos na fase de Projeto Conceitual são interligados e o processo é fortemente iterativo e interativo.

Para finalizar, deve-se realçar que grande é a importância da fase inicial de projeto no custo e no sucesso do produto final. Decisões tomadas nesta fase apresentam grande dificuldade, e respectivo alto custo envolvido, em serem alteradas nas fases posteriores do desenvolvimento de um produto (ULMANN, 1992:8 - figura 2.11).

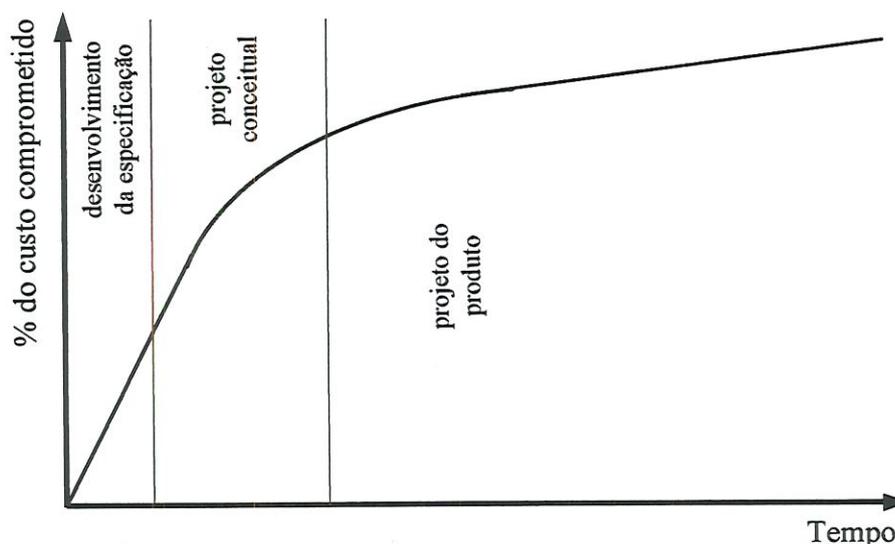


FIGURA 2.11. INFLUÊNCIA DO PROJETO NO CUSTO DE MANUFATURA (ULMANN, 1992:8)

Ao sistematizar o processo de Projeto Conceitual, obtém-se uma maior eficiência e velocidade de desenvolvimento. Ao se incluir o computador nesta fase, acelera-se ainda mais o processo de planejamento e desenvolvimento de produtos, o que é necessidade essencial no mercado competitivo de hoje. Exemplos da introdução de sistema computacionais no projeto de produtos, com suas vantagens constatadas, são os sistemas de

CAD/CAM atuais. Deve-se frisar, porém, que estes sistemas de CAD agem e auxiliam principalmente nas fases tediosas e repetitivas do projeto.

2.3. Computadores no Projeto Conceitual

O uso de sistemas inteligentes pode ocorrer basicamente por duas linhas: o Projeto Automatizado, onde o sistema computacional trabalha autônomo, e o Projeto Auxiliado por Computador Inteligente, onde o sistema computacional interage com o projetista (figura 2.12). A atual tecnologia não permite o desenvolvimento de um sistema de Projeto Automatizado. O que se tem hoje são Sistemas Inteligentes de Projeto Auxiliado por Computador, sublinhando-se o termo "projeto auxiliado". Em outras palavras, é função do homem aplicar a criatividade. Ao computador resta a função de assistir ao projetista em todos os estágios e objetos do projeto.

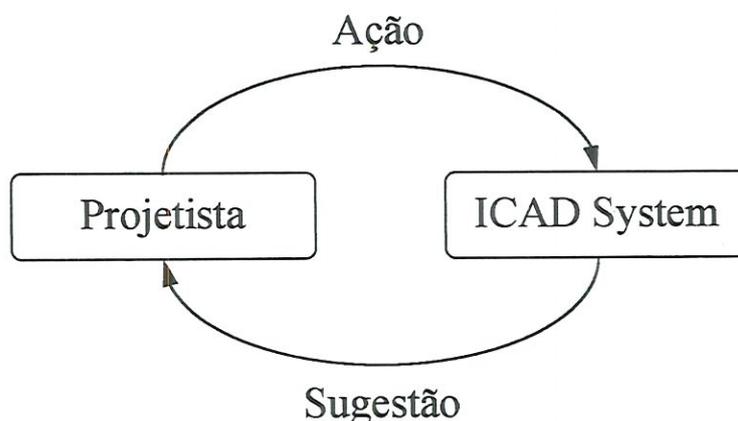


FIGURA 2.12. TRABALHO COM ICADSYSTEM (NADIM & NOVAK, 1987:160)

Razoável quantidade de trabalhos tem surgido nesta área da aplicação de computadores no Projeto Conceitual. De maneira geral, os trabalhos apresentados são propostas de sistemas computacionais com três características interessantes: a) são específicos para algumas das fases do Projeto Conceitual ou para aplicações bem delimitadas; b) preocupam-se em

deixar claro que seus objetivos são o de auxiliar o projetista, e não de substituí-lo; e c) preocupam-se em definir uma metodologia de projeto para transferí-la para o computador.

Dentre os pesquisadores que têm atuado na pesquisa da aplicabilidade do computador no Projeto Conceitual, pode-se citar HUNDAL & LANGHOLTZ (1992) que apresentam um programa de computador escrito em C para ambiente *X Window System*, desenvolvido no Massasuchetts Institute of Technology. Este programa auxilia o projetista na montagem da seqüência dos elementos necessários para transformar energia obtida em certa fonte em uma aplicação desejada. O programa trabalha em dois níveis de abstração. Inicialmente o usuário define, com o auxílio do programa, a seqüência de princípios físicos necessários para a transformação desejada e, num segundo estágio, determina os elementos físicos que desempenham cada um dos princípios físicos envolvidos, baseado em sua base de conhecimentos. Segundo os mesmos autores, seu programa

"... uses data bases of requirements, functions and solutions, and evaluation techniques, to generate the conceptual design. (..) It starts with the specifications list, develops function structures and searches for solutions, for systems with mechanical, electrical/ electronic, fluid and other components. It can be used for developing new and improving existing devices, systems and processes."
HUNDAL & LANGHOLTZ (1992:1)

Neste trabalho, eles definem também funções físicas para representação da informação no computador.

O programa é denominado de aplicação geral, pois permite que o usuário forme sua própria base de conhecimentos, bastando portanto que se utilize uma base compatível para a aplicação do programa em qualquer área da engenharia. Esta característica, porém, exige a presença e o conhecimento do projetista na área, além de ser susceptível às tendências apresentadas pelo projetista. Em outras palavras, o programa refletirá o estilo do projetista que montou sua base de conhecimentos.

As duas principais limitações do programa proposto são: a) ele apenas auxilia e organiza o trabalho do projetista, não projetando por si só; e

b) as regras de inferência são fixas, permitindo-se alterar apenas a base de conhecimentos. O programa permite a divisão de um elementos em subelementos, ou seja, a divisão de um problema maior em subproblemas menores e mais fáceis de se resolver.

Em trabalho anterior, HUNDAL (1990:249) apresenta uma proposta de sistema cujo procedimento interno do programa segue o Método de Projeto Sistemático (systematic design method), e o Método de Resolução Discursivo. O uso do Método Discursivo para o processo de projeto em programas de computador é vantajoso pois ele baseia-se em variantes de processos físicos e no uso de esquemas de classificação e catálogos de projeto, dados mais facilmente representados e manipulados por sistemas computacionais (HUNDAL, 1990:249). Características interessantes do programa são sua aplicação geral e a possibilidade de o usuário incrementar sua base de dados pela adição de novas funções e soluções. O autor, porém, sublinha o fato de o programa

"... will not model the creativity of or replace a gifted designer. Rather, the program can help a good or even an average designer to improve upon his/her creative process." (HUNDAL, 1990:253)

Naquele trabalho, HUNDAL (1990:244) apresenta em seu artigo um programa desenvolvido para

"... the specification list, functional block diagram, search for solutions, develop concept variants and the final solution concept."

Este programa apresenta como produto final

"... the solution concept, a functional schematic of the product/process showing a pictorial view of its parts wich are drawn from the solution data base." HUNDAL (1990:244)

Outro trabalho relacionado é o de WELCH & DIXON (1992), onde se realça a necessidade de se definir corretamente as formas de representações das funções e atributos utilizadas no processo do Projeto Conceitual, afim de facilitar a transferência do mesmo para o computador. Nas palavras dos autores, eles preocupam-se

"... on the representation of design information for the class of conceptual design problems that can be described by input and output functional parameters." (WELCH & DIXON, 1992:11)

SZYKMAN & CAGAN (1992), apresentam a proposta de um ambiente de projeto gráfico em desenvolvimento, com as interessantes características de permitir a subdivisão do problema inicial, a manipulação de vários níveis de abstração e a representação de diferentes tipos de conhecimento, escrito em *Allegro Common Lisp* para *workstations* Sun, com algumas variações. O programa também trabalha em dois níveis de abstração, mas com um princípio diverso. Inicialmente, o projetista determina os contornos do problema, utilizando o chamado *system-specific knowledge*, armazenado numa base de conhecimentos específica. Numa explicação simplificada, este conhecimento é fornecido pelo projetista e especifica o tipo e os contornos do problema que deve ser resolvido com o auxílio do programa.

Em seguida, em outro nível de abstração, o programa utiliza o denominado *domain-specific knowledge*, armazenado em outra base de conhecimentos, para manipular as informações contidas no módulo *system-specific knowledge*, verificando inconsistências e calculando as respostas para cada problema ou subproblema.

As principais limitações do programa são: a) a especificidade de cada versão do módulo do *domain-specific knowledge*; para atuar em determinada área da engenharia, deve-se prover ao programa o módulo com as regras e equações relacionadas àquela área; em outras palavras, trocam-se as regras de inferência do programa para cada aplicação específica, via alteração de parte do código-fonte; b) a necessidade da presença do projetista frente ao computador, pois a cada inconsistência encontrada compete ao mesmo apresentar uma solução alternativa, via alteração do módulo de *system-specific knowledge*. Este programa também permite a subdivisão de um problema, afim de facilitar sua resolução.

Estes autores, citando artigo de PAZ-SOLDAN & RINDERLE (1989) observam que

"... conceptual design involves alternating steps of reasoning in which detail is initially ignored to focus on one design aspect, followed by the addition of complexity to the design representation." SZYKMAN & CAGAN (1992:27)

Com base nisto, concluem que

"... is therefore important that a knowledge representation used for a CAD tool be able to simultaneously maintain representations of a design (or portions of a design) at different levels of abstraction." SZYKMAN & CAGAN (1992:27)

Os mesmos autores citam que os subproblemas não são desacoplados, apesar de separados, com um influenciando sobre o outro. Além disso, citam que características desejadas num ambiente de projeto computacional são: a) o uso de abstração; b) a decomposição de problemas; c) a geração e teste de projetos; e d) o uso tão simples quanto possível de representações gráficas. Todas estas características são as apresentadas pelo projetista, o ser humano, sendo por esta razão desejáveis em sistemas computacionais de apoio ao projeto.

SZYKMAN & CAGAN (1992) terminam por concluir que a substituição do projetista pelo computador é ainda um objetivo longínquo e o desenvolvimento de programas de apoio ao mesmo é uma área aberta a pesquisas, propondo seu próprio trabalho como

"... intended to be part of a design aid for use by a human ..." (p.28)

A necessidade da representação e manipulação de diferentes tipos de conhecimento também é citada por TAKEDA et al (1992:168). Nesse artigo, divide-se o conhecimento sobre "como projetar" do conhecimento sobre "propriedades e comportamentos de objetos". Segundo os autores, os dois tipos de conhecimentos são necessários para o se atingir um bom projeto.

Os programas apresentados são considerados como de auxílio ao trabalho do projetista pelos próprios autores. Seus autores sublinham o fato de serem os programas propostas a serem incrementadas e concluem que a

pesquisa nesta área está ainda iniciante. Esta atualidade da pesquisa na área não subentende, porém, falta de resultados já razoáveis e interessantes.

Outros trabalhos que podem ser citados são aqueles que discutem metodologias para Projeto Conceitual aplicada a sistemas computacionais. Neste rol temos os trabalhos de BEITZ (1987), KRAUSE (1991), HUNDAL (1990) e HUNDAL (1991).

Nestes dois últimos trabalhos, o autor apresenta uma proposta para implementação da pesquisa de soluções e da construção de uma Matriz Morfológica através do computador e oferece sua visão geral do tratamento que deve ser dado ao Projeto Conceitual visando implementá-lo em um sistema computacional.

Em outro trabalho, HUNDAL & LANGHOLTZ (1992), incluem uma descrição das características necessárias e desejadas para uma interface gráfica aplicada em um sistema de Projeto Conceitual e detalham o funcionamento de um provável programa de Projeto Auxiliado por Computador Inteligente (intelligent computer aided design). Neste mesmo trabalho, a se realçar ainda que os autores propõem que o usuário, através do seu programa, monte os subsistemas componentes da solução de maneira interativa - o usuário é que informa quais subsistemas devem ser utilizados - e, após esta montagem, o sistema passa a buscar as funções básicas cadastradas em um catálogo. Uma diferenciação deste trabalho em relação a outros é que seus autores (HUNDAL & LANGHOLTZ, 1992) não usam princípios físicos no catálogo, mas sim soluções básicas já conhecidas, o que impede o surgimento de uma solução realmente nova através do uso do programa proposto.

No Brasil, cita-se o trabalho de SILVA et al (1989), que apresentam um programa de computador apenas baseado em técnicas de Inteligência Artificial para auxílio na seleção apoios de eixos-árvore de máquinas ferramentas. Cita-se este programa, apesar dele não utilizar efetivamente técnicas de Inteligência Artificial, por ser uma das primeiras propostas de uso da mesma no projeto mecânico. No caso, propôs-se um complemento a trabalho já desenvolvido.

Também pode-se citar o trabalho de MARTINS et al (1989), dos primeiros trabalhos no Brasil que buscam aplicabilidade da Inteligência Artificial na engenharia. Não diretamente relacionado ao projeto mecânico, o trabalho propõe um programa de computador baseado na Inteligência Artificial para atuação no planejamento do processo, criando uma ponte "inteligente" entre o projeto pronto e a fabricação do produto.

Vários trabalhos tem surgido nos últimos anos relacionados ao uso de sistemas computacionais aplicados ao Projeto Conceitual. HUANG et al (1994) propõem uma ferramenta para Projeto Conceitual de sistemas de transmissão mecânica, onde numa base de conhecimentos é representada a árvore de funções relacionadas àquele tipo de produto. Através desta base de conhecimentos, o projetista é dirigido desde a idéia inicial até a definição final dos componentes mecânicos que comporão a solução final.

COLTON & OUELLETTE (1993) apresentam um modelo de Projeto Conceitual baseado em computador onde a maior ênfase é dada na especificação de um relacionamento entre função e forma dos componentes. Com base nesta idéia, um sistema computacional sugere possíveis soluções de um problema mecânico apresentando componentes previamente cadastrados em sua base e conhecimentos. Como vários outros autores, estes realçam que o modelo é válido independentemente do domínio, porém, por outro lado, a base de conhecimentos é totalmente dependente do domínio do problema. Neste trabalho, a se realçar também o fato de os autores apresentarem as soluções em forma de representações gráficas e esquemáticas. STURGES et al (1996) discutem em seu trabalho a influência que a forma de representar as relações entre funções de projeto e alocações, ou seja, requisitos, princípios de solução e efeitos, tem no desempenho do procedimento do projeto conceitual. Com este objetivo, eles apresentam um sistema computacional de auxílio para o desenvolvimento dos modelos funcionais de relacionamento que, segundo os mesmos autores, é de aplicabilidade em vários domínios. Também UMEDA et al (1996), em continuação ao trabalho iniciado pelo prof. Tetsuo Tomiyama (TOMIYAMA &

YOSHIKAWA, 1987), centram foco nas capacidades de modelamento funcionam dos Sistema Inteligentes de Projeto Auxiliado por Computador, propondo uma ferramenta computacional denominada Function-Behavior-State (FBS) Modeler. Eles também realçam a influência que as definições feitas na fase de Projeto Conceitual têm sobre as características e o custo do produto final e que sistema comerciais para auxílio ao projeto ainda não fornecem soluções para a fase de Projeto Conceitual.

Discutindo a forma de representar o raciocínio de projeto num sistema computacional, CLIBBON & EDMONDS (1996), sugerem um Sistema Baseado em Conhecimento, generalista, baseado em lógica de multi-níveis, uma extensão da lógica de primeira ordem. THORNTON (1996), por sua vez, sugere métodos que facilitem a identificação de soluções viáveis a partir de um conjunto complexo de restrições para a solução. Ele cita vários métodos de pesquisa baseado na Inteligência Artificial, tais como algoritmos genéticos e *simulated annealing* e métodos que incorporam o conhecimento das restrições do projeto no processo de busca.

Especificamente para o Projeto Conceitual de turbinas de aviões, SHAHROUDI (1994) desenvolve e implementa um Ciclo de Projeto Natural (natural design cycle), onde é deixado para o computador muito do trabalho repetitivo e cansativo necessário para as definições do anteprojeto, liberando o projetista para maior uso da sua intuição, afim de se gerar outras possíveis soluções para um dado problema específico. Neste processo, toda a decisão é deixada para o projetista. A implementação do sistema é feita em C ANSI.

ROSENMAN (1993) levanta que o enfoque humano de um problema de projeto obedece uma seqüência de subdivisões do problema global original até se permitir fazer investigações mais detalhadas. CHEN et al (1992) apresenta um programa para seleção de parafusos, baseado nas aplicações de cada tipo contidas numa base de conhecimentos. FENG & ZHANG (1992) apresentam um sistema de CAD que integra representação geométrica e Sistema Baseado em Conhecimento, demonstrando a aplicabilidade deste enfoque. ISHII et al (1994) propõem um sistema que

facilita a implementação do raciocínio utilizado durante a fase de Projeto Conceitual mecânico. Outro trabalho relacionado é o de OHMACHI et al (1993), que apresenta um Sistema Baseado em Conhecimento para o projeto de engrenagens para transmissão de potência.

Uma visão interessante, que defende o uso de catálogos na busca de soluções na fase de Projeto Conceitual, é a apresentada por BRACEWELL & SHARPE (1996). Estes autores defendem que o uso de catálogos que envolvam um repertório de opções tecnológicas de várias áreas concorre diretamente para a remoção de antigas restrições para possíveis soluções de projeto e a ampliação do número dessas soluções. Um sistema baseado em computador contendo uma base de conhecimentos estruturada em árvore de decisão é proposto, cujo objetivo é auxiliar o projetista pela aplicação de princípios de trabalho cadastrados e pelo direcionamento na decomposição dos requisitos livremente formatados do problema, até se atingir funções requeridas rigorosamente definidas. Outro autor que realça a necessidade de o projeto se basear em requisitos funcionais e em catálogos de mecanismos e componentes existentes previamente cadastrados é CHAKRABARTI & BIGH (1996). Segundo estes autores, as soluções apresentam melhores qualidades se o projetista pode explorar um espaço de busca mais amplo. O sistema computacional proposto baseia a busca de soluções na configuração espacial e na topologia dos conceitos de solução constantes de sua base de conhecimentos, explorada pelo projetista. Nesta área, também pode-se citar o trabalho de PEIEN et al (1996), que igualmente defende a necessidade de catálogos onde o sistema computacional se apoiará para inferir soluções.

Outros trabalhos que podem ser citados são os de KAWAKAMI et al (1996), ERMER et al (1993), em trabalho inicial; GORTI & SRIRAM (1996), realçando a necessidade de se trabalhar com esquemas gráficos, SCHMIDT & CAGAN (1993), WANG et al (1995a), COLTON & PUN (1994), COLTON & OULLETTE (1994), VANWELKENHUYSEN (1995), LEE et al (1996), estes justificando fortemente o uso de esquemas gráficos, ANDERSSON (1994),

WANG et al (1995b), JUNG & BILLATOS (1993), KUSIAK & SZCZERBICKI (1992), DUFFY et al (1996), discorrendo sobre a estruturação da base de conhecimentos necessária para um sistema computacional aplicável às fases iniciais do projeto de engenharia, PUTTRE (1993), que relaciona várias ferramentas computacionais para uso no Projeto Conceitual, EVBUOMWAN & SIVALOGANATHAN (1994) que utilizam o Método de Análise Morfológica, já citado anteriormente, BREEDVELD (1993) e SCHMIDT & CAGAN (1995).

ANDERSSON et al (1995) apresentam trabalho interessante centrado na pesquisa e proposição de sistema computacional que trabalhe com a linguagem natural e a terminologia da área de engenharia, afim de facilitar a passagem para o computador das informações relativas à modelagem do problema, nas fases mais iniciais do projeto. Neste sentido, o objetivo é já direcionar a solução do problema proposto para uma metodologia de engenharia desde o início do processo de maneira o mais natural possível.

Trabalhos que realçam a necessidade de sistemas computacionais de aceitar o processo natural do engenheiro conceitual, qual seja o de reconhecer croquis de soluções (freehand sketch) e, a partir desses, auxiliar o projetista na fase de Projeto Conceitual até a obtenção de soluções, são os de LIPSON & SHPITALNI (1995), GROSS (1996), JENKINS & MARTIN (1993) e também o de MUKHERJEE & LIU (1995). Este último sugere um método para representação dos elementos da solução, já no Projeto Conceitual, em forma de abstração esquemática (sketching abstraction), visando facilitar a integração com as fases subseqüentes do projeto que trabalhem com dados geométricos.

Trabalhos que realçam a necessidade de sistemas computacionais disporem de uma base de conhecimentos / base de dados com soluções já conhecidas para problemas semelhantes, que serão utilizadas para auxiliar e/ou dirigir o projetista em novos problemas que podem ser citados, entre outros, são os de KUMARA & KAMARTHI (1992), OXMAN (1994), BARDSZ & ZEID (1992) e GRIGELY & BILLATOS (1993).

ROY et al (1995) e ROY (1996), em continuação, apresentam um trabalho em que propõem a integração entre um Sistema Inteligente de Projeto Auxiliado por Computador e um programa comercial de Engenharia Auxiliada por Computador, no caso o I-Deas, visando permitir-se o acesso às melhores características de cada um, a capacidade de “raciocínio” do primeiro, e a capacidade de representação gráfica e simulação do segundo.

No Brasil, dois trabalhos bastante atuais podem ser citados, ambos de FIOD & BACK (1995a e 1995b). Nestes trabalhos, os autores continuam trabalho anterior, no primeiro discutindo as formas de obtenção de soluções para problemas de projeto e no segundo discutindo métodos de avaliação das soluções identificadas.

Um resumo que pode ser feito dos trabalhos levantados indica para alguns pontos em comum muito importantes: a) sistemas computacionais devem se apoiar em bases de conhecimentos solidamente formadas; b) devido à constatação anterior, estes sistemas apresentam abrangência específica, com base na área de conhecimentos retira por eles; c) a subdivisão do problema do projeto em subproblemas, visando a sua resolução, é uma metodologia que tem demonstrado ser de grande confiabilidade; d) o uso de sistemas computacionais para a fase de Projeto Conceitual otimiza o desenvolvimento do produto, seja pela integração que estes permitem com as fases sucedâneas do desenvolvimento do produto, seja pela capacidade de fornecer um leque maior de soluções conceituais, e e) sistemas computacionais devem oferecer uma interface baseada em esquemas, haja visto ser esta a linguagem natural do engenheiro de projetos, conforme LEE et al (1996):

“Conceptual graphs are chosen for their expressive power to represent both declarative and procedural knowledge, and for their assimilation capability.” (LEE et al, 1996:2)

Um trabalho que visa implementar um sistema para Projeto Conceitual em computador é o de FIOD (1993). Neste trabalho, o autor propõe um processo de projeto que dirige o projetista através das fases desse

processo. Este trabalho será mais discutido na seção posterior, já que ele propõe igualmente uma nova Metodologia de Projeto Conceitual mecânico.

2.4. Metodologia de Projeto Conceitual

Várias metodologias de Projeto Conceitual tem surgido ultimamente, principalmente devido à constatação de sua importância para a implementação de Sistemas Inteligentes de Projeto Auxiliado por Computador (intelligent computer aided design system). Ao lado destas, podem ser reconhecidas metodologias de projeto já clássicas, formadas sem considerações acerca de sua implementação em ambientes computacionais. Finalmente, há metodologias de Projeto Conceitual que são propostas de adaptações de algumas metodologias clássicas para sua transferência para sistemas computacionais.

Dentre os trabalhos relacionados a este tema, alguns principais devem ser citados, com suas respectivas propostas de metodologias para Projeto Conceitual.

SUH (1990) propõe um Modelo Axiomático. Neste modelo, a principal importância recai nos requisitos funcionais do projeto, ou seja, os requisitos de aplicabilidade do produto a ser projetado, baseados diretamente nas necessidades externadas pelo futuro consumidor. Este método apoia-se em dois princípios básicos: o Axioma da Independência - os requisitos devem ser independentes entre si - e o Axioma da Informação - deve-se minimizar o conteúdo das informações disponíveis em relação aos requisitos, reduzindo-as às essenciais. SUH (1990) ainda propõe oito regras a serem obedecidas pelo projetista na busca de um Projeto Conceitual de boa qualidade. Estas regras são, de maneira geral, baseadas em critérios de senso comum aliados a conhecimentos de engenharia.

Ainda segundo SUH (1990), o processo de projeto conta com três passos: a) definição do problema, através da definição de seus requisitos funcionais; b) processo criativo de concepção e idealização; e c) processo

analítico de avaliação da solução. Num resumo geral, este método parte de informações abstratas (requisitos funcionais) e busca concretizá-las em um produto final, sistematizando as ações e os procedimentos. O método propõe a substituição da intuição e experimentação desordenada por axiomas ou leis, citadas acima.

HOOVER, RINDERLE & FINGER (1991) realçam a necessidade da abstração nas primeiras etapas, afirmando que este procedimento simplifica o problema, facilitando a busca das soluções.

Por sua vez, YOSHIKAWA (1989), em trabalho extenso, relaciona e apresenta três escolas de Metodologia de Projeto: a) a escola semântica; b) a escola sintática; e c) a escola historicista.

Segundo ele, na escola semântica só há fluxos de energia, de matéria e de sinal. A solução do problema é um sistema técnico - encadeamento logicamente estruturado de funções técnicas e subfunções - representado pela transformação de energia, matéria ou sinal. Na escola semântica, a função global, que representa o problema inicial, é subdividida em subfunções mais simples, iterativamente, até se identificarem fenômenos físicos a elas relacionados. Assim, se permite que através da catalogação de efeitos físicos conhecidos, soluções reais sejam encontradas. Alguns destes catálogos de efeitos físicos podem ser encontrados em KOLLER (1985) e ROTH (1982), segundo FIOD (1993).

Ainda segundo YOSHIKAWA (1989), a escola sintática preocupa-se mais com os aspectos de procedimento do projetista na busca da solução ou soluções do que com o objeto de projeto em si. Autores que seguem esta escola seriam ASIMOW (1968), WOODSON (1966) e PAHL & BEITZ (1992), através da reunião que estes fazem do aspecto metodológico do projeto e do aspecto funcional do produto no modelo que propõem, associado à proposição de hierarquia entre funções e subfunções encontrada em seus trabalhos, e da defesa do uso de um procedimento sistemático.

Finalmente, ainda segundo YOSHIKAWA (1989), a escola historicista dá importância maior para o conhecimento envolvido no projeto,

exigindo que todo o conhecimento esteja disponível para o projetista no momento do desenvolvimento das soluções.

ASIMOW (1968) foi um dos primeiros autores a buscar sistematizar o processo de projeto, visando a obtenção de melhores projetos de forma mais sistêmica. Segundo sua visão, as fases primárias do projeto, aquelas relacionadas ao desenvolvimento da idéia do produto, englobam, partindo-se da Necessidade Primitiva: a) Estudo de Exeqüibilidade; b) Projeto Preliminar, e c) Projeto Detalhado (figura 2.13).

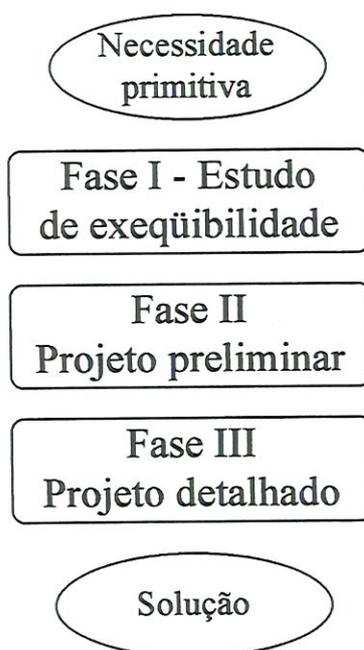


FIGURA 2.13. FASES PRIMÁRIAS DE UM PROJETO (ASIMOW, 1968:23)

Segundo ASIMOW (1968:24), o Estudo de Exeqüibilidade objetiva a consecução de um conjunto de soluções úteis para os problemas do projeto. Ainda segundo o mesmo autor, dentro do Estudo de Exeqüibilidade há três estágios: o primeiro consta da análise da situação na qual acha-se encaixado o problema; o segundo, da síntese de soluções possíveis; o terceiro, da avaliação das soluções e, caso haja algumas soluções aceitáveis, também da decisão sobre qual seja a melhor (ASIMOW, 1968:64) (figura 2.14).

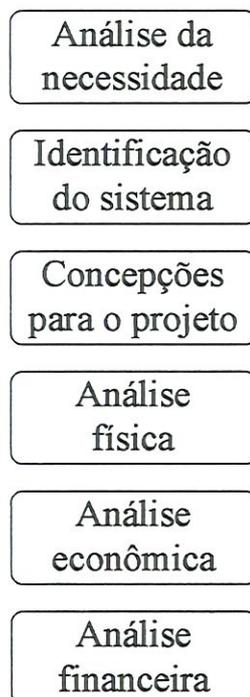


FIGURA 2.14. ESTUDO DE EXEQÜIBILIDADE (ASIMOW, 1968:32) (SIMPLIFICADO)

Este mesmo autor baseia a busca de soluções em catálogos de princípios físicos (ASIMOW, 1968:75-80).

Outro autor que deve ser citado, podendo ser igualmente considerado um dos precursores da escola sintática, é WOODSON (1966). Ele define as etapas de Estudo de Possibilidade, Estudo Preliminar, Projeto Detalhado e Revisão para o projeto mecânico (figura 2.15) e subdivide a primeira etapa em Análise da Necessidade, Exploração dos Sistemas Envolvidos, Síntese das Alternativas de Soluções, Determinação da Viabilidade Física, Análise Econômica, Análise da Disponibilidade Financeira (figura 2.16).

Estudo de Viabilidade	Para validar a necessidade e produzir uma série de soluções possíveis
Estudo Preliminar	Para quantificar os parâmetros de forma a obter a solução ótima
Projeto Detalhado	Para transformar a melhor solução em uma descrição para a manufatura
Revisão	Para produzir um projeto otimizado, baseado na experiência obtida com um sistema fabricado/testado

FIGURA 2.15. FASES DO PROJETO (WOODSON, 1966:24-25)

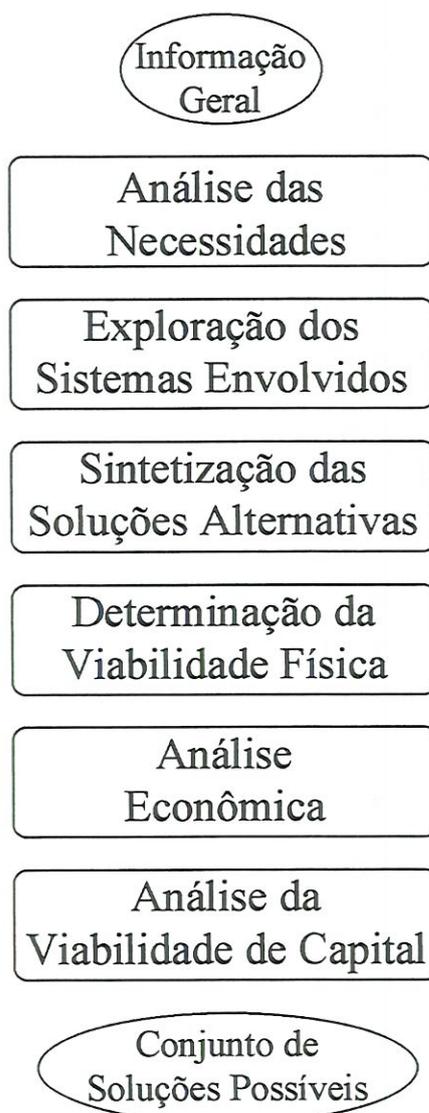


FIGURA 2.16. ESTRUTURA DO PROJETO. ESTUDO DE VIABILIDADE (WOODSON, 1966:26)

Na linha de metodologias voltadas ou adaptadas, ou ainda passíveis de serem informatizadas, podemos citar ROTH (1982), KOLLER (1985), estes citados por FIOD (1993), e VDI 2221 (1987), que já “preparam” uma metodologia de projeto passível de informatização. Neste rol, já citada, pode-se incluir a metodologia proposta por PAHL & BEITZ (1992). Estes autores, inclusive, propõem as bases para se desenvolver um Sistema de Projeto Auxiliado por Computador, aplicado à fase de Projeto Conceitual.

A VDI 2221 (1987) sugere a divisão do Projeto Conceitual e da busca de soluções em duas fases. Na fase I, procede-se ao estudo do problema a ser solucionado. Segundo PAHL & BEITZ (1992), deve-se gerar uma lista de requisitos do produto, podendo-se classificá-los em requisitos “obrigatórios” e “desejáveis” sendo estes últimos caracterizados com grande, média, ou pequena importância. Deve-se dividir os aspectos estudados em aspectos quantitativos e aspectos qualitativos, sempre buscando quantificar os requisitos.

Na fase II, fase de concepção, deve-se definir a função que representa o problema, através de um verbo - ação - e um substantivo - objeto da ação - (“cortar” “grama”), anexando-se as condições marginais tais como tamanho, peso, percurso desejado e outros. Pode-se definir a função global como uma “caixa preta”, onde de um lado entram as grandezas “sinal” (signal) - s , “energia” (energy) - e , e “matéria” (material) - m - e do outro lado saem as mesmas grandezas, porém modificadas pela função global. Na seqüência desta fase, divide-se a função global em funções parciais até se alcançarem os princípios físicos, levantados através de pesquisa bibliográfica, da análise de sistemas técnicos, da análise de sistemas naturais conhecidos, de analogias, de medições e de experiências com modelos. O seqüenciamento dos princípios físicos deve obedecer compatibilidade entre as características de saída de um princípio físico e as características de entrada do princípio físico subsequente.

Ainda segundo a VDI 2221 (1987), em seguida lança-se mão da Matriz Morfológica, possibilitando-se trocar as funções parciais entre soluções, combinando-as de formas diferentes e obtendo-se maior número de soluções, ou soluções variantes. A solução global é obtida associando-se princípios físicos viáveis em subsoluções realizáveis e estas, por sua vez, na solução global. (figura 2.17).

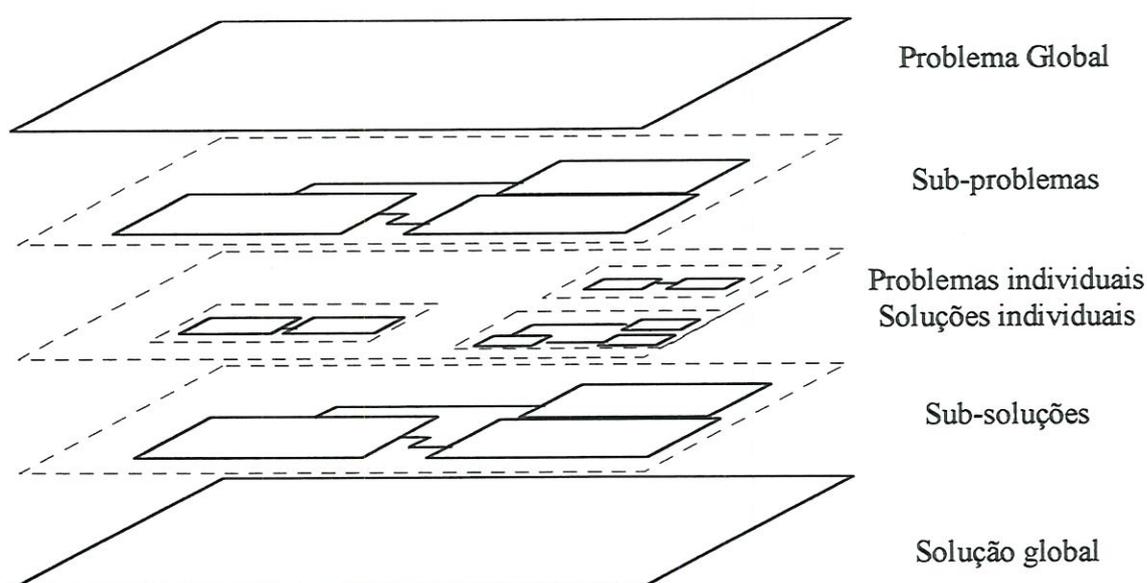


FIGURA 2.17. O MODELO DE DESENVOLVIMENTO DA VDI 2221 (CROSS, 1996:30)

O Método proposto por ROTH (1982), relacionado em FIOD (1993), denominado Método da Estrutura de Funções Genéricas, relaciona quatro operações genéricas, a saber, “conduzir” (channel) - mudança de lugar, “armazenar” (store) - constância de uma certa quantidade em determinado tempo, “transformar” (change) - mudança de forma de apresentação - e “unir” (connect). Esta última, para grandezas iguais, pode ser “aditiva” - juntar quantidade - e “distributiva” - separar quantidade. Para grandezas diferentes, ela pode ser “aditiva” - aplicação de uma quantidade do tipo Y sobre uma quantidade do tipo X - e “distributiva” - separar de uma quantidade do tipo Y uma quantidade do tipo X.

O mesmo método relaciona três grandezas genéricas: “matéria”, “energia” e “sinal”, o que vem de encontro às idéias de PAHL & BEITZ (1992) e outros. A combinação de uma operação genérica com uma grandeza genérica resulta em uma Função Genérica. Neste seu trabalho, o autor relaciona 220 verbos técnicos.

Por sua vez, o método proposto por KOLLER (1985), também relacionado em FIOD (1993), ou Método de Projeto Orientado Físico-Algoritmicamente, define doze operações básicas, sem relacioná-las a nenhuma grandeza. Este relacionamento, segundo aquele autor, deve ser feito apenas durante o projeto de um produto específico. As operações são ordenadas duas a duas, cada qual com sua inversa, a saber, “emitir / absorver” (absorb / emit), “transmitir / isolar” (channel / isolate), “agrupar / dispersar” (collect / scatter), “guiar / não_guiar” (conduct / insulate), “transformar / retro_transformar” (change / change back), “ampliar / reduzir” (increase / decrease), “mudar_direção / mudar_direção” (change direction / change direction), “retificar / oscilar” (rectify / oscillate), “ligar / interromper” (couple / interrupt), “misturar / separar” (join / separate), “juntar / dividir” (assemble / divide) e “acumular / desacumular” (store / empty).

Segundo FIOD (1993), KOLLER (1985) procura as soluções para as funções elementares escolhendo um efeito e um portador de efeito no catálogo previamente cadastrado - por exemplo, *efeito*: Lei de Hooke; *portador do efeito*: mola. A diversidade das soluções vem devido aos diferentes efeitos e portadores de efeitos que podem ser utilizados.

Uma metodologia que busca englobar partes das anteriores pode ser encontrada em PAHL & BEITZ (1992). Não deixando de ser altamente interativo, este método (de Projeto Sistemático) inicia-se logo após o estudo da tarefa, definindo os seguintes passos: a) clarificação do problema (clarification of the task), com elaboração da lista de requisitos; b) abstração para identificar os problemas essenciais (abstract to identify the essential problems), colocando o problema em termos de verbo-objeto; c) estabelecimento das estruturas funcionais (establish function structures), definindo a função global

e dividindo-a em subfunções até se obter as funções elementares através da subdivisão contínua das funções parciais; d) busca dos princípios de solução (search for solution principles to fulfil the sub-functions), com a aplicação do método da variação dos efeitos e uso de catálogos; e) combinação dos princípios de solução para remontagem da função global (combine solution principles to fulfil the overall function), lançando mão da recombinação da Matriz Morfológica (VDI 2221, 1987:39); f) seleção das combinações viáveis (select suitable combinations), com base na lista de requisitos; g) definição das variantes conceituais (firm up into concept variants); e h) avaliação técnica e econômica das variantes conceituais (evaluate concept variants against technical and economic criteria) (figura 2.18).

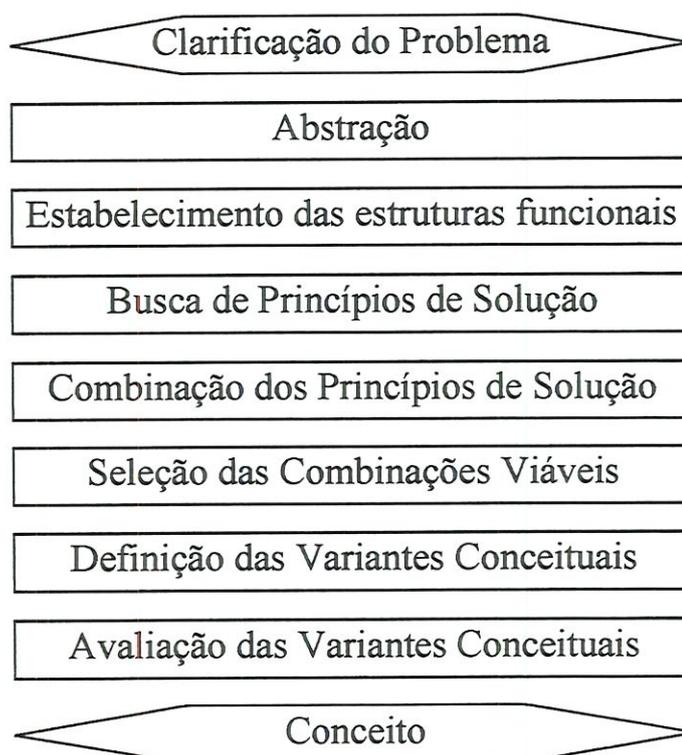


FIGURA 2.18. FASES DO PROJETO CONCEITUAL (PAHL & BEITZ, 1992: 58)

PAHL & BEITZ (1992) relacionam cinco funções geralmente válidas para as transformações de três grandezas básicas, "sinal", "energia" e

“matéria”, as mesmas da VDI 2221 (1987). Estas funções gerais são: transformar (change), conectar (connect), conduzir (channel) e armazenar (store). PAHL & BEITZ (1992) traçam eles mesmos um paralelo entre as suas funções geralmente válidas, as operações genéricas de ROTH (1982) e as operações básicas de KOLLER (1985), ambas relatadas em FIOD (1993), conforme a figura 2.19.

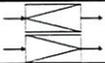
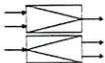
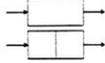
Operações Básicas de Koller (1985) / Fiod (1993)	Operações Genéricas de Roth (1982)	Funções Geralmente Válidas de PAHL & BEITZ (1992: 68)
change / change back transformar / retro_transformar	change mudar/transformar	change (type) 
change direction mudar direção		vary (magnitude) 
increase / decrease ampliar / reduzir	connect conectar	connect (number) 
couple / interrupt ligar / interromper		
join / separate unir(misturar) / separar		
assemble / divide montar(juntar) / dividir	channel conduzir	channel (place) 
channel / isolate transmitir / isolar		
collect / scatter agrupar / dispersar		
rectify / oscillate retificar / oscilar		
conduct / insulate conduzir(guiar)/separar(não_guiar)	store armazenar	store (time) 
absorb / emit absorver / emitir		
store / empty acumular / esvaziar(desacumular)		

FIGURA 2.19. COMPARAÇÃO DE FUNÇÕES GERALMENTE VÁLIDAS (PAHL & BEITZ, 1992: 27)

Numa comparação com metodologias anteriores citadas, PAHL & BEITZ (1992) englobam várias delas e identificam-se claramente com a de SUH (1990) e VDI-2221 (1987).

Esta Metodologia do Projeto Sistemático é a base para o trabalho desenvolvido por FIOD (1993). Neste trabalho, o autor propõe uma

metodologia sistemática para o Projeto Conceitual, lançando mão das doze operações básicas de KOLLER (1985) (figura 2.19). O autor apresenta um Sistema para Auxílio ao Projeto Conceitual Sistemático, que dirige o usuário pelas fases de projeto propostas, visando, principalmente, tornar a qualidade da solução tanto quanto possível independente da inspiração, porém sem prescindir da criatividade e inventividade. Neste sistema computacional, a metodologia de projeto proposta apoia-se firmemente numa base de conhecimentos composta de princípios físicos e componentes mecânicos.

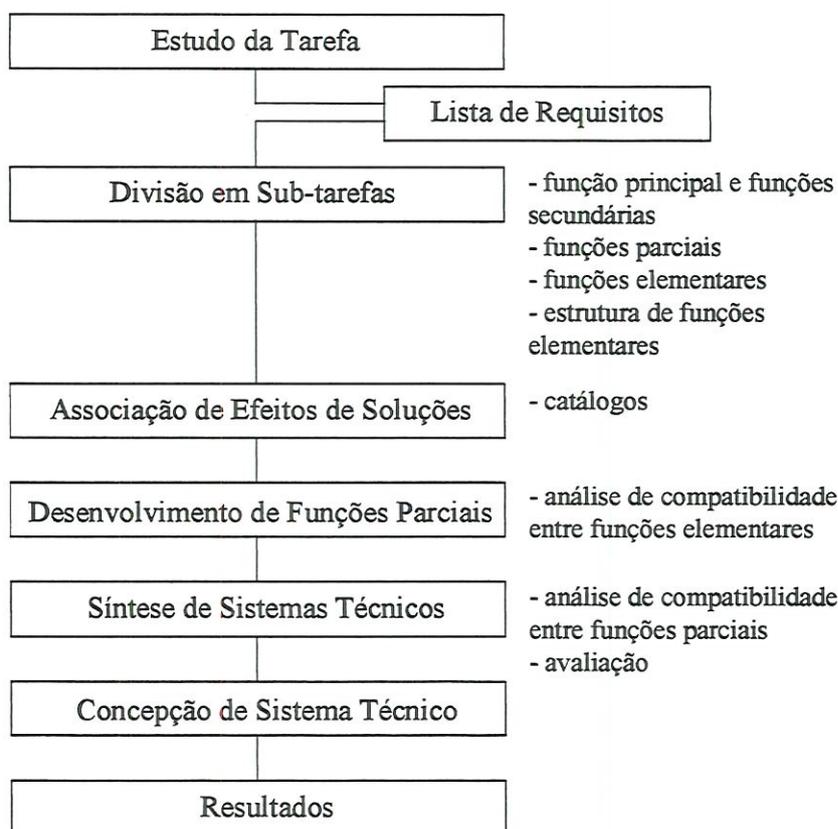


FIGURA 2.20. METODOLOGIA DE PROJETO CONCEITUAL (FIOD, 1993: 93)

A seqüência de ações para o Projeto Conceitual proposta por FIOD (1993) engloba as fases de: a) estudo da tarefa; b) montagem da lista de requisitos; c) divisão em subtarefas, partindo da função principal e funções

secundárias, até se obter a estrutura de funções elementares, passando pelas funções parciais; d) associação de efeitos de soluções, com uso de catálogos; e) desenvolvimento de funções parciais, considerando a análise de compatibilidade entre funções elementares; f) síntese de sistemas técnicos, analisando-se a compatibilidade entre funções parciais e avaliação dos sistemas obtidos, e f) concepção de sistema técnico, obtendo-se o resultado, ou solução do problema inicialmente proposto (figura 2.20).

Os estágios do processo de projeto, segundo CROSS (1996: 45-46), no seu denominado Modelo Simétrico Problema/Solução, fortemente baseado na VDI 2221 (1987) são apresentados na figura 2.21.

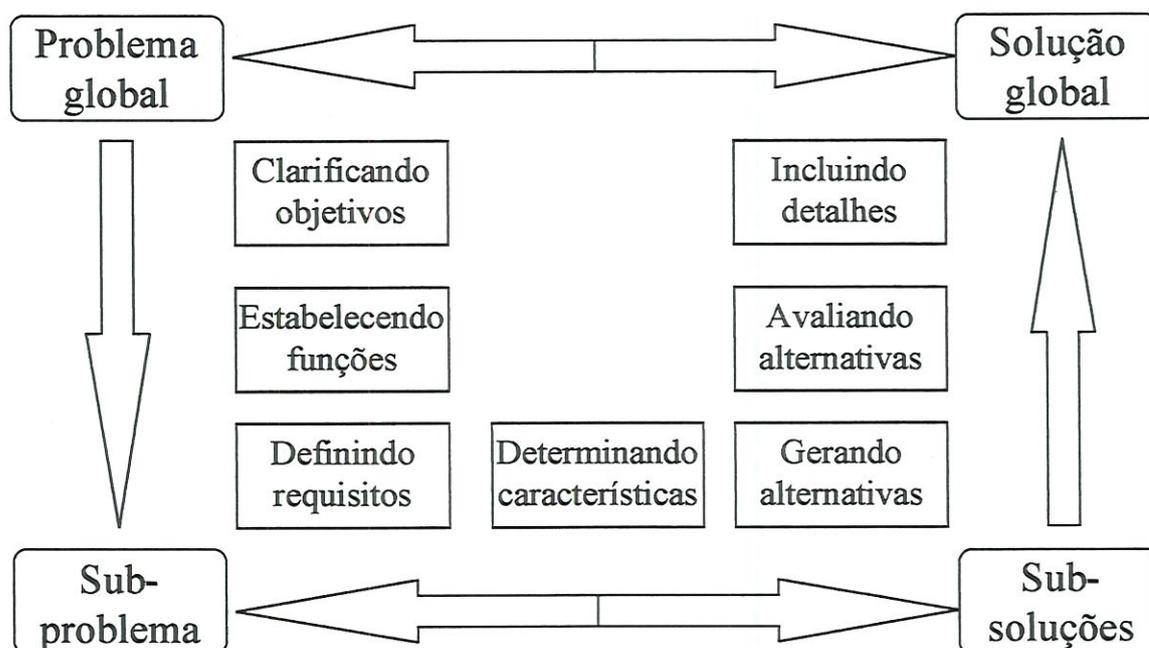


FIGURA 2.21. MODELO SIMÉTRICO PROBLEMA/SOLUÇÃO (CROSS, 1996:46)

CROSS (1996) lança mão do Método da Matriz Morfológica, similar ao de VDI 2221 (1987), com pequena variação consistindo em considerar cada linha da matriz como uma subfunção, atrelada diretamente a um componente. Cada coluna da Matriz Morfológica, para cada linha, contém os componentes que podem executar a subfunção respectiva. Este enfoque,

aliás é muito próximo ao de PAHL & BEITZ (1992), haja visto que tanto um quanto outro não chegam a atingir o nível de definição de princípios físicos. A se realçar que este método traz no seu bojo grande motivação sistemática, sendo que o autor cita textualmente o uso de procedimentos sistemáticos (systematic procedures) (CROSS, 1996:31).

Como pode ser verificado, enquanto alguns autores dão maior ênfase às fases de avaliação, outros dão maior enfoque às fases de geração de soluções. Todos, porém, apresentam vários pontos em comum, principalmente no que diz respeito à seqüência sistemática de procedimentos para a obtenção de soluções para problemas que não sejam atreladas somente à capacidade mental do projetista.

Um último autor que deve ser citado é ULMANN (1992), que propõe uma seqüência própria para a fase de Projeto Conceitual (figura 2.22).

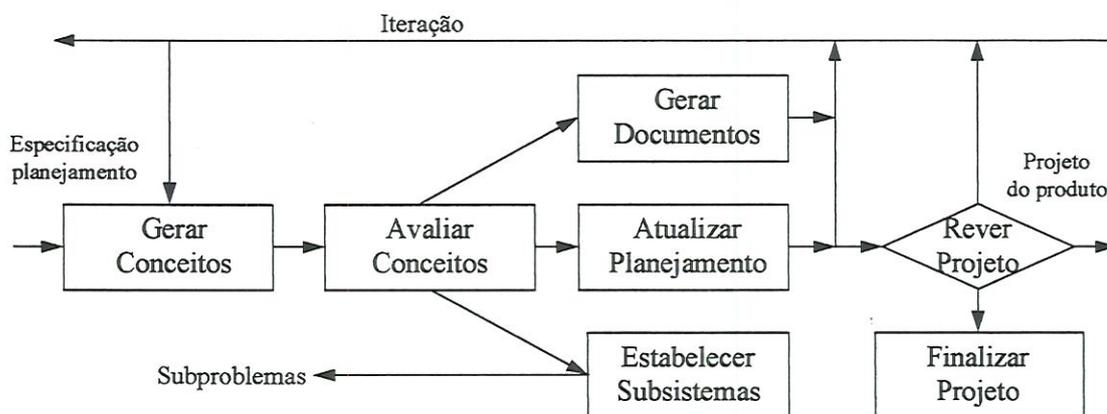


FIGURA 2.22. A FASE DE PROJETO CONCEITUAL (ULMANN, 1992: 141)

Os passos propostos por ULMANN (1992), tendo-se anteriormente especificado a necessidade e efetuado o planejamento do processo de projeto, são: a) Encontrar a função global que exprime a necessidade a ser solucionada, através de generalização do problema e sua abstração; b) Decompor a função global em subfunções, com base em sistemas já conhecidos e/ou com base nas várias funções que a solução deve

cumprir; c) Desenvolver conceitos para cada função, apoiado em uma base de dados, e d) Combinar conceitos. Na seqüência, ULMAN (1995) sugere a avaliação dos conceitos identificados.

O mesmo autor sugere uma lista de funções mecânicas típicas de projeto (figura 2.23) e cita como fontes para idéias conceituais as patentes, os livros de referência, os especialistas e o *brainstorming*.

Transformar (change)	Orientar (orient)
Aumentar/diminuir (Increase/decrease)	Localizar (locate)
Acoplar/interromper (couple/interrupt)	Coletar (collect)
Unir/Separar (join/separate)	Proteger (secure)
Montar/desmontar (assemble/disassemble)	Mover (move)
Conduzir ou guiar (channel or guide)	Converter (convert)
Retificar (rectify)	Tranformar (transform)
Conduzir (conduct)	Transladar (translate)
Absorver/eliminar (absorb/remove)	Rotacionar (rotate)
Armazenar (store)	Iniciar/cessar (start/stop)
Verificar (verify)	Levantar (lift)
Dirigir (drive)	Segurar (hold)
Posicionar (position)	Limpar (clear)
Libertar (release)	Suportar (support)
Dissipar (dissipate)	Suprir (supply)

FIGURA 2.23. FUNÇÕES MECÂNICAS TÍPICAS DE PROJETO (ULMANN, 1992:145)

2.5. Conclusão

Através deste pequeno painel apresentado, pode-se concluir que o uso de computadores na etapa do Projeto Conceitual ainda inicia-se a nível internacional. Na verdade, os chamados Sistemas Especialistas estão atualmente ainda na fase de desenvolvimento, sem ter atingido a fase de aplicação comercial. Verificam-se apenas alguns poucos Sistemas Baseados em Conhecimento disponíveis comercialmente e, mesmo assim, com aplicação

limitada. Grandes pesquisas ainda são necessárias para prover programas de computador que efetivamente auxiliem o projetista, o ser humano, na sua tarefa de conceber o projeto. A substituição do projetista nesta tarefa é de efetivação ainda mais difícil. Grandes esforços, porém, tem sido destinados a esta área de pesquisa, o que sugere a sua importância.

Além das dificuldades inerentes ao processo de transferir conhecimentos para o computador, há a necessidade de melhor conhecer e entender o processo de Projeto Conceitual desenvolvido dentro da mente do projetista. Esta área, intimamente ligada à anterior, tem sido objeto de atenção de muitos pesquisadores.

Dentro da engenharia mecânica, uma das poucas áreas não totalmente dominadas é a da metodologia de projeto e da aplicação da computação nas fases iniciais do projeto. Apesar do grande direcionamento de esforços internacionais para estas áreas, o que reforça sua importância como campo de pesquisa atual, apresenta-se ainda em franco desenvolvimento, sem conhecimentos totalmente sedimentados.

Por tratar-se de área estratégica no domínio do conhecimento de projeto, e na aceleração do desenvolvimento deste conhecimento, deve ter sua importância devidamente sublinhada e não pode prescindir de investimentos em qualquer sociedade que se interesse em participar da comunidade internacional como proprietária de conhecimentos.

A situação brasileira, como de costume, apresenta-se atrasada alguns anos em relação aos centros mais desenvolvidos internacionalmente. Porém, por tratar-se de área ainda em desenvolvimento, esta situação pode e deve ser alterada.

Especificamente relacionado com esta constatação, insere-se o programa de pesquisa do Laboratório de Máquinas Ferramentas do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos, voltado para a pesquisa da aplicabilidade do computador nas fases iniciais do projeto mecânico. Esta proposta de doutorado insere-se neste grupo



ALMEIDA, Francisco José de. *Sistematização e Automação do Ambiente de Projeto: o Enfoque da Sintaxe*. São Carlos, SP. Novembro de 1997.

de trabalho, apresentando uma proposta suficientemente bem embasada que permite-se garantir um desenvolvimento satisfatório.

3. Proposição e Validação da Metodologia de Projeto Conceitual

3.1. O Tema Escolhido

A etapa de desenvolvimento de projetos já tem sido há muito estudada. O principal objetivo destes estudos é a tentativa de identificar os procedimentos internos daquela etapa e a conseqüente busca da sua regulamentação, para viabilizar a posterior implementação em sistema computacionais (CANDY & EDMONDS, 1996).

Sendo um processo eminentemente baseado na inteligência, visto requerer grande quantidade de intuição e adaptação a situações não totalmente previstas, ele tem-se ligado historicamente à área de competência do homem dentro do processo de projeto mais abrangente.

Ora, o uso dos computadores na substituição do homem apresenta várias vantagens, como por exemplo a diminuição da fadiga humana, a retirada do homem de processos agressivos à vida, a maior rapidez, a diminuição de erros e a maior repetibilidade dos resultados. Devido às suas próprias características, porém, o computador apresenta limitações nas suas áreas de atuação. Como principal limitação deste uso, pode-se citar a carência de inteligência dos "cérebros eletrônicos".

Dentro da engenharia mecânica, e mais especificamente, na área do projeto mecânico, o computador tem níveis de atuação diferenciados nas várias etapas envolvidas. O processo de projeto pode ser dividido em Projeto Conceitual, anteprojeto, cálculos de avaliação e detalhamento do projeto. As etapas de cálculos e de detalhamento, por apresentarem características de

repetibilidade de cálculo e roteirização mais fixa, apresentam grande uso dos computadores. Assim, surgem as áreas de conhecimento denominadas por Desenho Auxiliado por Computador e Engenharia Auxiliada por Computador. As demais, porém, apresentam-se não viáveis para os mesmos.

Tal realidade tem mudado a partir do surgimento da Inteligência Artificial, cujo objetivo é justamente permitir que o computador atue em áreas onde o homem apresenta melhor desempenho.

Assim, consideradas as vantagens que o uso da computação apresenta em substituição ao homem, aliadas a outras específicas da área da Inteligência Artificial, tem recebido grande interesse o desenvolvimento de sistemas computacionais voltados para as fases iniciais do projeto mecânico, como poderá ser verificado no corpo deste trabalho. A necessidade de atualização da Engenharia Mecânica, através do uso de sistemas automatizados, implementados em computador, é realçada por BAR-COHEN (1995).

Para tanto, pode-se definir duas áreas específicas de conhecimento, às quais terão seu entrelaçamento sublinhado, a Inteligência Artificial, que fornece as ferramentas necessárias para a viabilização da aplicação do computador nas primeiras fases do projeto mecânico, e o estudo das Metodologias de Projeto, que possibilitam o entendimento e a metodização dos procedimentos de desenvolvimento de projetos, viabilizando a sua transferência, ou tradução, para o computador.

3.2. Metodologia de Projeto Conceitual Proposta

A questão inicial que deve ser respondida, antes de se propor qualquer novo método para informatizar a fase de Projeto Conceitual, é qual seria a necessidade de se utilizar o computador também neste fase de projeto. A resposta pode ser dada se consideramos que, com o computador, poderão ser disponibilizadas muito mais rapidamente as informações necessárias ao projetista, através da geração de uma base de conhecimento, poder-se-á

metodizar o processo, tornando-o mais independente da criatividade do projetista, além de se viabilizar a integração desta fase com as demais, subseqüentes, do projeto.

Além disso, o estudo aprofundado de uma metodologia para Projeto Conceitual auxilia no entendimento do processo mental humano, o que, ao menos, contribui para a otimização deste processo e a conseqüente otimização do produto deste processo, qual seja, a solução física para um dado problema proposto.

O método de projeto a ser implementado deve apresentar, entre outras, as seguintes características: a) encorajar a abordagem direta; b) estimular a inventividade e o entendimento; c) facilitar a aplicação de soluções conhecidas; d) ser compatível com o processamento eletrônico; e) ser de fácil ensino e aprendizado e, f) refletir o moderno gerenciamento, ou seja, reduzir a sobrecarga, economizar tempo, prevenir erros humanos e manter o interesse (PAHL & BEITZ, 1992:4-5).

Com base nas metodologias de Projeto Conceitual levantadas, este trabalho propõe sua própria metodologia, visando principalmente implementar um Sistema Inteligente de Projeto Auxiliado por Computador. Com isto, busca-se efetivar o computador como auxiliar ao projetista também na fase de Projeto Conceitual. Os parâmetros para a definição desta nova Metodologia são os mesmos já suficientemente discutidos nos capítulos anteriores, lembrando-se dos mais importantes: um método sistemático, apoiado em uma base de conhecimento específica para a área de aplicação do sistema, englobando regras de projeto, através de um Mecanismo de Inferência, e interatividade.

Diferentemente de outras metodologias, esta prescinde da confecção de uma lista de requisitos de uma maneira formal. Esta lista de requisitos é substituída pela definição natural das características desejadas para o Objeto e para a ação, de forma muito mais próxima do real, pelo usuário/projetista. Paralelamente, a metodologia proposta inicia o auxílio ao

projetista já na fase de identificação do problema, sistematizando-a e direcionando-a.

Igualmente, esta metodologia prescinde da fase de abstração, pois, da forma como o problema é especificado, já se garante a generalização e precisão da necessidade a ser satisfeita.

Outra característica interessante que esta metodologia apresenta é o fato de ser genérica, ou seja, aplicável a qualquer área de conhecimento. Este fato é visível através da ferramenta computacional de implementação da metodologia, o Sistema Baseado em Conhecimento desenvolvido, que conta com um catálogo gerenciável de Componentes disponíveis. Esta característica permite que se obtenham soluções ainda não conhecidas para problemas propostos, visto as soluções serem obtidas por combinação viáveis de todos os Componentes cadastrados. Ainda, por permitir a atualização do catálogo, com inclusão de novos Componentes pelo usuário, o sistema proposto apresenta um escopo bastante abrangente. Para utilizar o sistema em uma área não coberta pela base de conhecimento disponibilizada, basta cadastrar-se novos conhecimentos relacionados àquela área.

Finalmente, a metodologia permite a automatização completa das fases de definição das Funções Parciais, da identificação dos Princípios Físicos e da busca dos Componentes que satisfaçam um problema, sempre mantendo a possibilidade de intervenção do usuário em qualquer momento.

Como já se tem colocado em oportunidades anteriores, nem este, nem qualquer outra metodologia de Projeto Conceitual visa substituir o projetista, mas sim, auxiliá-lo nas tarefas criativas ligadas a esta fase do projeto. A criatividade do projetista conta com um espaço reservado, haja visto que o usuário pode atuar sobre a base de conhecimento, incluindo, alterando e excluindo fatos ou dados que deseje. Desta forma, o projetista pode, caso deseje, incluir na base de conhecimento qualquer solução já conhecida para qualquer problema, direcionando a resposta obtida. Assim, a metodologia e o sistema proposto valorizam a experiência e os conhecimentos pessoais.

A metodologia proposta apresenta a seguinte seqüência, a qual deve ser obedecida pelo usuário na resolução de um problema de projeto:

- a) *Definição do Problema*: definir corretamente o problema, colocando-o em termos de um binômio verbo-objeto (por exemplo cortar grama). O problema assim definido vai permitir definir-se a Função Global da solução; a definição do problema também deve conter as limitações do problema (requisitos), caracterizando-o, através das características do Objeto do problema e das características necessárias e desejadas para a ação do problema.
- b) *Definição da Função Global*: em termos de uma “caixa-preta”, que representa a solução geral para o problema proposto; a função global pode ser entendida como o sistema geral da solução (figura 3.1).

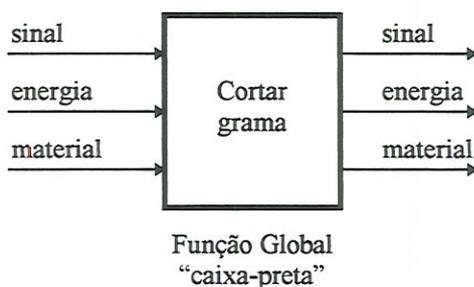


FIGURA 3.1. FUNÇÃO GLOBAL

- c) *Definição das Funções Parciais*: a partir da Função Global, subdividi-la em Funções Parciais (figura 3.2); para se definir as Funções Parciais necessárias, o programa vai utilizar regras do tipo:

SE potência necessária é alta ENTÃO existe função parcial de geração de energia

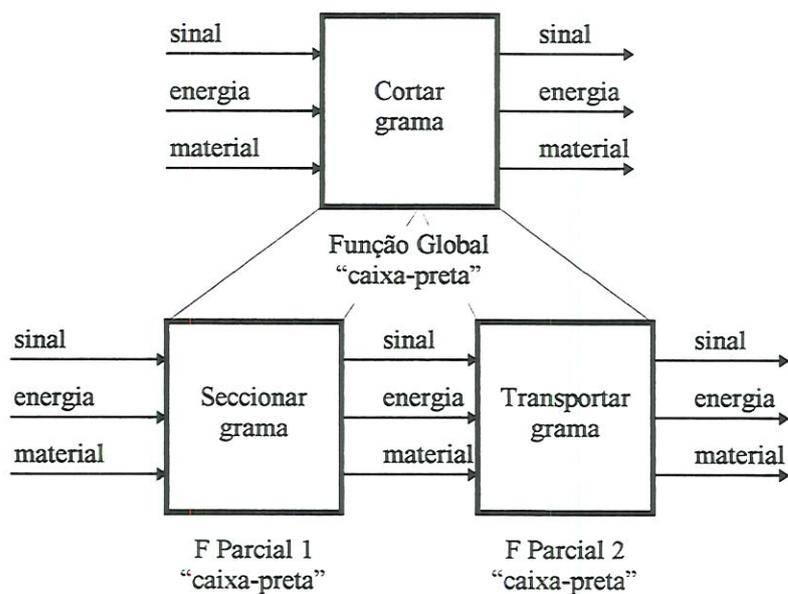


FIGURA 3.2. FUNÇÕES PARCIAIS

As regras a serem colocadas no programa são definidas pelo próprio usuário, ou especialista de projeto da área envolvida, o que define uma grande genericidade do modelo proposto. Estas regras são montadas com base nas características definidas para o Objeto do problema e nas características necessárias e desejadas para a ação do problema (requisitos do problema).

d) *Definição das Funções Elementares*: a partir de cada Função Parcial, subdividi-la até se chegar às funções mais simples que estão englobadas em cada Função Parcial, as denominadas Funções Elementares (figura 3.3); estas Funções Elementares são baseadas nos Verbos e nos Objetos cadastrados no sistema.

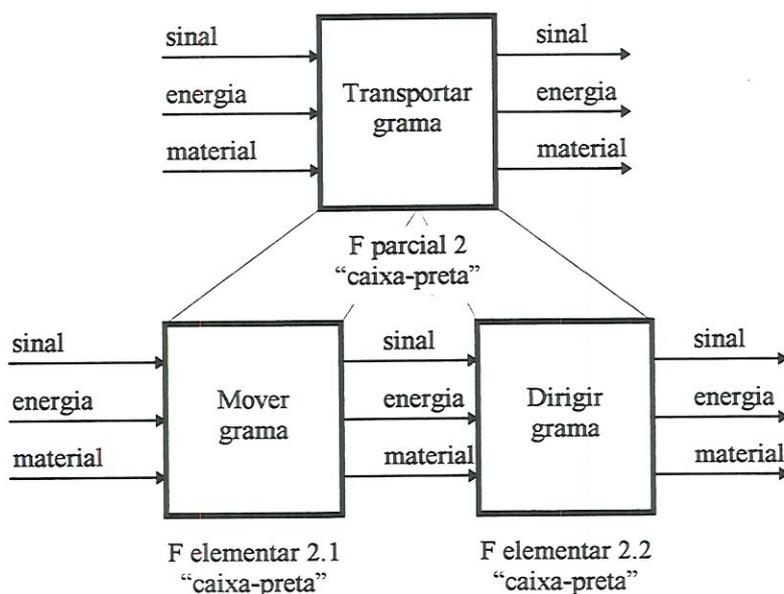


FIGURA 3.3. FUNÇÕES ELEMENTARES

e) *Definição dos Princípios Físicos*: para cada Função Elementar, relacionar um Princípio Físico (figura 3.4); nesta etapa, pode-se definir mais de um Princípio Físico para cada Função Elementar; os Princípios Físicos levantados vão formar uma Matriz Morfológica, em moldes semelhantes aos propostos por PAHL & BEITZ (1992) e VDI 2221 (1987).

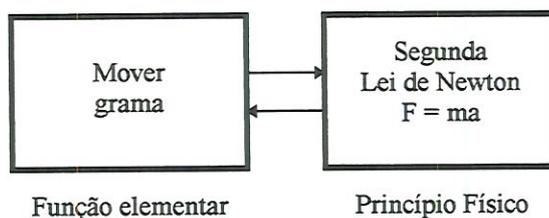


FIGURA 3.4. PRINCÍPIOS FÍSICOS

Segundo a proposição de PAHL & BEITZ (1992:109), a Matriz Morfológica é formada, de um lado pelos vários princípios físicos que podem executar uma dada função elementar, e, de outro lado, pela série de funções elementares que compõem a solução para um problema proposto. As funções

elementares formam as colunas da Matriz Morfológica, enquanto os princípios físicos viáveis formam as linhas respectivas de cada coluna. Através da Matriz Morfológica pode-se “montar” várias soluções par o problema, escolhendo-se e combinando-se um princípio físico de cada coluna com princípios físicos de colunas subseqüentes. A Matriz Morfológica é uma ferramenta eficiente na busca de soluções baseadas na decomposição do problema original em funções elementares.

- f) *Recombinação dos Princípios Físicos de cada Função Elementar*: pode-se alternar posições de Princípios Físicos adjacentes, visando o aumento das possíveis soluções para o problema proposto. Esta alternância deve obedecer as características de entrada e de saída de cada Princípio Físico cadastrado. Em outras palavras, garante-se seqüências de solução viáveis do ponto de vista científico.

- g) *Identificação dos Componentes*, através da combinação de um seqüência de Princípios Físicos, trocando-os por um Componente do catálogo; a escolha de um Componente vai obedecer às limitações do problema (requisitos já informados). Garante-se nesta fase uma seqüência de Componentes, que é uma solução para o problema definido no início do processo, avaliada quanto aos requisitos identificados para o mesmo problema (figura 3.5).

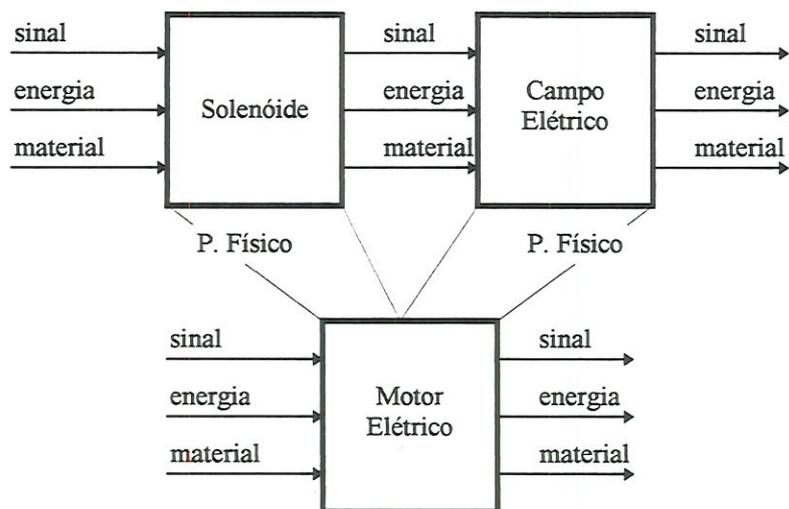


FIGURA 3.5. COMPONENTES

Ainda nesta fase, é calculada a adequabilidade de cada solução encontrada. Esta adequabilidade considera as características cadastradas para os Componentes que fazem parte da solução, comparando-as com as características necessárias e desejadas para a ação do problema. Como se verá mais adiante, pelo fato de as características de ação cadastradas no sistema computacional ora proposto utilizarem lógica difusa nas definições de suas instanciações, é possível se obter soluções com vários níveis de adequabilidade em relação ao que se deseja para solucionar o problema.

h) *Recombinação dos Componentes*; alternando-se as posições entre os Componentes identificados, visando obter-se maior quantidade de soluções viáveis para o problema proposto. Esta alternância de posições obedece às características de entrada e saída dos Componentes, garantindo-se, identicamente à fase f, seqüências fisicamente viáveis.

Uma vez encontrada uma solução, o método de projeto proposto tenta alternar as posições dos componentes participante da solução, afim de gerar novas soluções. É o caso, por exemplo, de alterar-se a posição de um eixo (elemento transmissor de potência), colocando-o entre o motor (gerador de potência) e o redutor (que adapta a potência), gerando uma solução e,

depois, colocando-o após aquele redutor, entre este e a roda (elemento que utiliza a potência), gerando outra solução. Nestas alternâncias, a metodologia obedece a compatibilidade entre o tipo de energia que sai de um componente e o tipo de energia que entra no componente subsequente. Esta informação é específica de cada componente e é mantida na base de conhecimentos respectiva, sendo obtida do especialista da área.

3.3. Implementação da Metodologia de Projeto Proposta: Sistema Inteligente de Projeto Auxiliado por Computador

Conforme já apresentado na Parte A deste trabalho, revisão bibliográfica, a fase de Projeto Conceitual não pode prescindir da inteligência. A proposição da passagem de uma Metodologia de Projeto Conceitual para o computador deve, então, considerar a disponibilização de “inteligência” para o sistema computacional a ser desenvolvido. Nestes termos, passa a ser necessário lançar-se mão das técnicas de Inteligência Artificial no desenvolvimento do referido sistema computacional. Conforme também já visto, sistemas computacionais desenvolvidos obedecendo os paradigmas da Inteligência Artificial e apoiados em bases de conhecimento são denominados Sistemas Baseados em Conhecimento. O desenvolvimento de vários sistemas computacionais baseados na IA que têm alcançado sucesso em sua implementação dá a motivação e o estímulo necessários para se partir para este desenvolvimento. Os sucessos já alcançados comprovam que a Inteligência Artificial e os Sistemas Baseados em Conhecimento são ferramentas de aplicabilidade viável (RUSSELL & NORVIG, 1995:24).

Neste trabalho, propõe-se um Sistema Baseado em Conhecimento que abranja os seguintes procedimentos, em obediência à Metodologia de Projeto Conceitual já proposta e apresentada (figura 3.6):

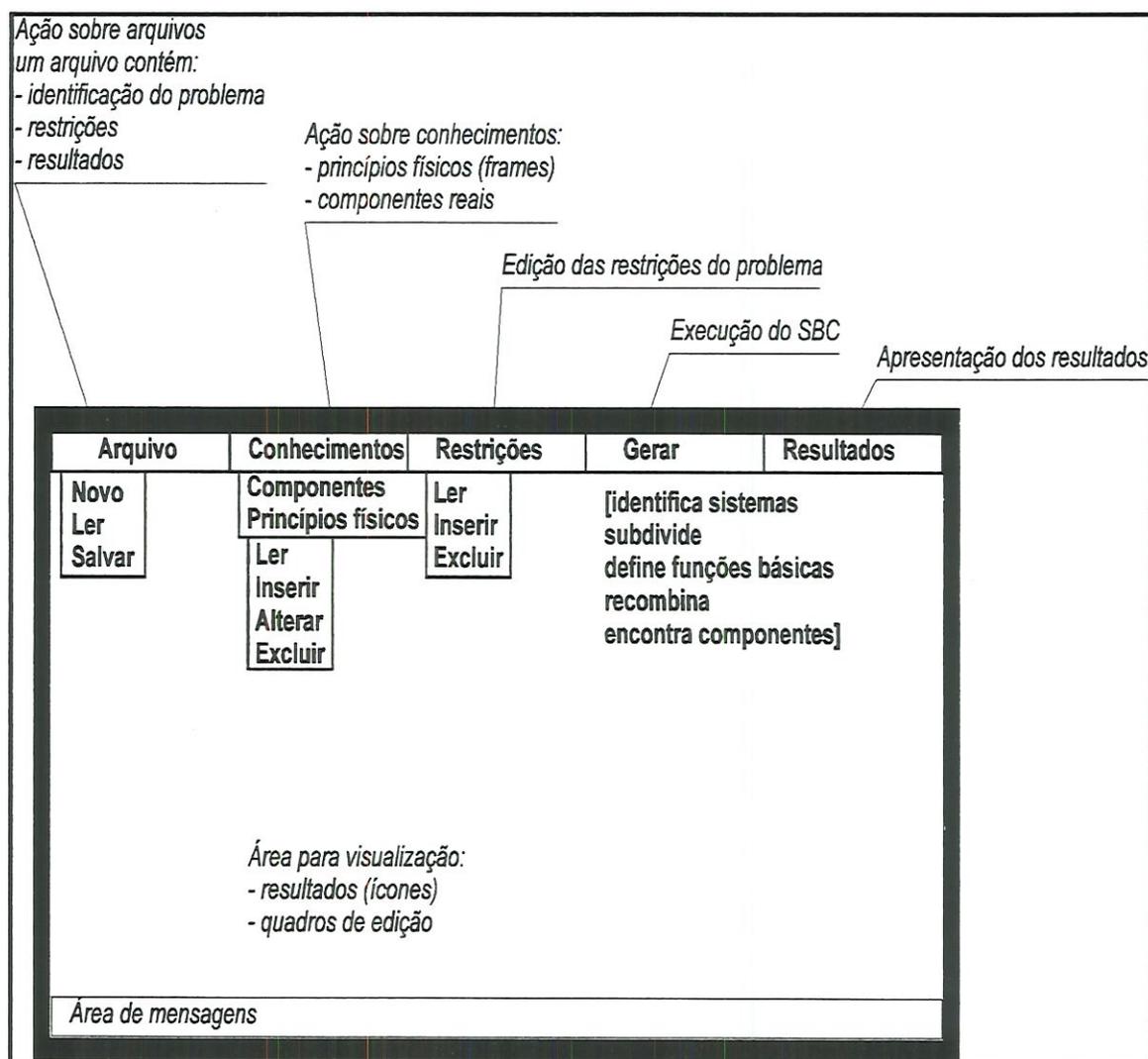


FIGURA 3.6. APRESENTAÇÃO DO SISTEMA BASEADO EM CONHECIMENTO PROPOSTO

- a) Informação das restrições do problema: o usuário informará a necessidade de um determinado produto, já definida a função do mesmo, e as restrições existentes para o projeto;
- b) Definição dos sistemas necessários: o programa, apoiado na base de conhecimento, definirá quais sistemas farão parte da solução como, por exemplo, um sistema de fonte de energia, um sistema de transmissão de energia e um sistema de corte;

- c) Subdivisão dos sistemas em elementos e estes em subelementos, até se atingir os Princípios Físicos básicos: esta subdivisão irá se basear em métodos de SADT ou similares; os Princípios Físicos básicos são os constantes em várias referências, tais como WOODSON (1966), FIOD (1993), TIPLER (1995), SEARS & ZEMANSKI (1978), SEARS et al (1990) e HALLIDAY et al (1996);
- d) Combinação de vários Princípios Físicos em Componentes disponíveis, como, por exemplo, motor elétrico: esta combinação visa apresentar ao usuário as respostas encontradas como seqüências de Componentes existentes; para tanto, se apoiará na base de conhecimento, que contém exemplos de Componentes relacionados aos Princípios Físicos escolhidos,
- e) Recombinação dos Componentes identificados, afim de prover-se maior número de soluções apresentadas: esta recombinação obedecerá as características de entrada e de saída dos Componentes, garantindo-se assim que as soluções serão compostas necessariamente por seqüências fisicamente viáveis de Componentes;
- f) Apresentação das soluções, preparando-as para a fase de avaliação: esta apresentação, uma seqüência de Componentes existentes, não se preocupará com o *layout* do produto, ou seja, a posição espacial entre os Componentes, nem abrangerá soluções com mais de uma ramificação, como, por exemplo, um redutor com duas saídas.

Por ser um trabalho de pesquisa, procurou-se projetar um sistema o mais genérico possível, afim de que ele servisse como um embrião para futuros sistemas mais complexos, mais completos e mais específicos, sem esquecer, porém, que se trata de um sistema para aplicação na atividade de Projeto Conceitual. Esta generalidade é conseguida com uma Representação

do Conhecimento bem esquematizada, em forma de Frames e Regras de Produção, e com possibilidades de atualização e inclusão de novos conhecimentos pelo próprio usuário. Assim, para atuação em uma área de conhecimento, basta ao usuário inserir conhecimentos relativos a esta área. Esta inserção é implementada de maneira simples e direta pelo usuário, sem necessidade de se alterar o código fonte do programa. A escolha da representação através de Frames e Regras de Produção deve-se ao fato de ser este tipo de raciocínio mais comumente utilizado por projetistas.

No desenvolvimento do Sistema Inteligente de Projeto Auxiliado por Computador, também foram considerados os requisitos de funcionalidade que programas deste tipo devem apresentar. Segundo KIMURA (1989:31), alguns destes requisitos são: a) criar e manter múltiplos trabalhos simultâneos: esta característica empresta flexibilidade ao sistema e o aproxima do trabalho usual do projetista, que normalmente está ligado a mais de um projeto ao mesmo tempo; b) permitir esboços das soluções: sendo o Projeto Conceitual um processo eminentemente iterativo, o projetista muitas vezes inicia com um esboço que é melhorado durante o processo de projeto ; c) tratar e manter restrições: as restrições do projeto devem ser inseridas no sistema computacional, que as utilizará para filtrar e avaliar os conhecimentos contidos em base de conhecimento; d) sugerir soluções apropriadas ao projetista: o Sistema Inteligente de Projeto Auxiliado por Computador deve trabalhar como uma extensão da memória do projetista, informando-o das soluções viáveis para um problema; e) avaliar as soluções do projeto: o sistema computacional deve avaliar as opções de soluções, auxiliando o projetista na escolha de uma delas, e f) produzir documentação e justificativas: afim de garantir a adequabilidade do sistema, este deve apresentar as justificativas para suas proposições, as quais podem ser analisadas pelo projetista, que avaliará ou não a resposta proposta. Este último requisito também pode ser entendido como a necessidade dos Sistemas Baseados em Conhecimento de apresentar facilidades de explanação (explanation facility) (DURKIN, 1994:30-31). Estas facilidades devem ser de dois tipos: explicando o Como (explaining How), ou

seja, o Sistema Baseado em Conhecimento deve poder explicar como ele obteve um resultado, quais regras de inferência e conhecimentos ele utilizou, remontando a seqüência lógica percorrida, ou o raciocínio utilizado; e explicando o Por que (explaining Why), ou seja, o sistema computacional deve poder explicar ao usuário porque ele precisa de uma certa informação.

3.3.1. Metodologia para desenvolvimento de Sistema Baseado em Conhecimento

O desenvolvimento de um sistema computacional requer a aplicação de uma metodologia que facilite este desenvolvimento, através de um planejamento bem efetuado, e de orientações embasadas durante a implementação. Várias fontes disponíveis oferecem metodologias para o desenvolvimento de sistemas computacionais gerais. Estas metodologias, porém, aplicam-se a sistemas computacionais que não os de inteligência artificial, tais como os de gerenciamento de bases de dados e os de cálculos matemáticos e científicos. Como já colocado, o desenvolvimento de um sistema baseado em conhecimento apresenta características específicas, sendo as mais acentuadas o tratamento com uma base de conhecimentos e a lógica declarativa. Assim, metodologias tais como as de JONES (1991), NG & YEH (1990), NG (1993) e PRESSMAN (1995) não são aplicáveis neste caso.

Bibliografias da área da inteligência artificial, em geral, preocupam-se em apresentar as partes componentes de um sistema baseado em conhecimento sem, contudo, oferecer uma metodologia para desenvolvimento de sistemas deste tipo. Alguns autores que podem ser citados são TANIMOTO (1987:462-463), GINSBERG (1993), HOGGER (1990:155 e 215), WINSTON (1993) e LUGER & STUBBLEFIELD (1989). Estes autores apenas indicam procedimentos gerais, tais como a necessidade de se tratar e manter separados a base de conhecimentos, o motor de inferência e a interface com o usuário. WATERMAN (1986:139) vai um pouco mais longe e sugere que o desenvolvimento de um sistema baseado em inteligência artificial deve passar por várias etapas de desenvolvimento,

iniciando com um sistema demonstrativo (demonstration system) e chegando, após grande desenvolvimento iterativo da sua base de conhecimentos, a um sistema comercial (commercial system), passando pela classificações de prototype, research, field e production.

Especificamente para o desenvolvimento deste Sistema Inteligente de Projeto Auxiliado por Computador, utilizou-se a metodologia proposta por DURKIN (1994:40). Esta metodologia, uma das pouquíssimas que se preocupam em propor procedimentos e seqüências detalhadas para o desenvolvimentos de sistemas baseados em conhecimento, sugere seis fases a serem seguidas para o desenvolvimento de Sistema Baseado em Conhecimento (figura 3.7), explicadas a seguir.

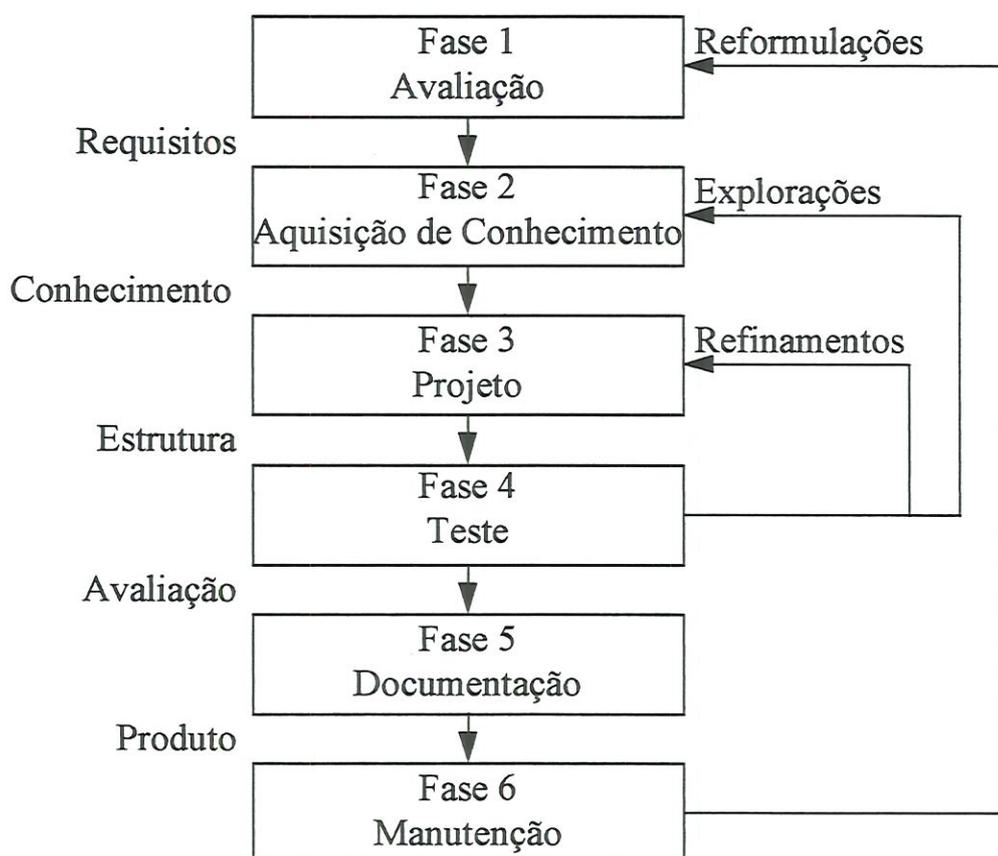


FIGURA 3.7. FASES DE DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS ESPECIALISTAS (DURKIN, 1994:40)

Fase 1: Avaliação (assessment): Nesta fase é feita a avaliação e justificação do problema candidato. Em seguida, caso o problema candidato seja justificável para implementação num Sistema Baseado em Conhecimento, são definidos os objetivos globais do projeto, as características principais e o escopo do projeto, bem como as necessidades de recursos envolvidos, tais como necessidades de conhecimentos a serem levantados e de pessoal para o desenvolvimento do sistema computacional.

Fase 2: Aquisição de Conhecimento (knowledge acquisition): Nesta fase é adquirido o conhecimento necessário para a implementação do Sistema Baseado em Conhecimento. A aquisição deste conhecimento é geralmente o gargalo do desenvolvimento de Sistemas Baseados em Conhecimento, conforme DURKIN (1994: 41). Várias fontes de onde se pode obter o conhecimento necessário, bem como procedimentos para a obtenção deste conhecimento são apresentados em BIELAWSKI & LEWAND (1991), DURKIN (1994), MOCKLER & DOLOGITE (1992), WATERMAN (1986) e WATERMAN & KLAHR (1986).

Fase 3: Projeto (design): Nesta fase é definida a forma de Representação do Conhecimento a estar contido no Sistema Baseado em Conhecimento e a estrutura geral da base de conhecimento. Também se define nesta fase o Mecanismo de Inferência a ser modelado no sistema. Estas definições são baseadas no tipo de conhecimento obtido na fase 2 e no escopo e principais características do problema identificados anteriormente. Nesta fase também é desenvolvido um protótipo do sistema, que é ampliado iterativamente até se obter o sistema final.

Fase 4: Teste (testing): Nesta fase, uma continuação natural das anteriores, é verificada a validade das decisões tomadas anteriormente e corrigida a direção do desenvolvimento do sistema, caso necessário. Através da iteração entre as fases 2, 3 e 4, o protótipo inicial do sistema é ampliado de maneira cíclica, até se atingir um sistema funcional. Esta ampliação do sistema

computacional é geralmente permanente, pois a cada novo passo dado se identifica outras necessidades a serem cobertas pelo sistema.

Fase 5: Documentação (documentation): Conforme vários autores (PRESSMANN, 1995) (HUMPHREY, 1995) (MACRO, 1990) (SOMMERVILLE, 1990) (NG & YEH, 1990) (MAYRHAUSER, 1990), a documentação de qualquer sistema computacional é imprescindível para se alcançar a qualidade desejada. Esta documentação deve englobar explicações sobre o funcionamento do programa e um possível tutorial, e relacionar organizadamente o conhecimento utilizado e o Mecanismo de Inferência utilizado. Esta documentação é de vital importância na fase de manutenção do sistema computacional.

Fase 6: Manutenção (maintenance): A manutenção periódica de qualquer sistema computacional é condição imprescindível para se manter a satisfação do usuário com o mesmo. Especificamente em se tratando de Sistemas Baseados em Conhecimento, a fase de manutenção possibilita o crescimento do sistema, com inclusão de novos conhecimentos e novas opções. Esta manutenção do sistema pode também vir a sugerir reformulações mais gerais no escopo e abrangência do Sistema Baseado em Conhecimento desenvolvido.

3.3.2. Linguagem de programação

Definição importante no desenvolvimento de qualquer sistema computacional é a escolha da linguagem de programação a ser utilizada na implementação do código-fonte. De acordo com esta escolha, fica definida a maior ou menor facilidade no desenvolvimento do programa, a plataforma para execução do programa desenvolvido e algumas características gerais que o sistema computacional irá apresentar.

Os requisitos básicos primordiais definidos para a escolha de uma linguagem de programação a ser utilizada no caso específico deste trabalho foram: a) capacidade de implementação de uma interface amigável a

nível de usuário, condição altamente desejável para qualquer sistema computacional e, especificamente, com maior razão para Sistemas Baseados em Conhecimento (SCHMIDT, 1990:290) (WALDRON, 1991:72-74); b) capacidade de geração de programa executável a partir do código-fonte desenvolvido, afim de melhor disponibilizar o uso do sistema após ter sido implementado; um programa executável, além de oferecer maior velocidade de execução, apresenta maior portabilidade, menor necessidade de recursos de sistema instalados na máquina e maior facilidade de transporte e instalação em vários equipamentos; c) facilidade de tratamento sobre a base de conhecimento, na forma de representação destes conhecimentos escolhida para o sistema em questão, e d) facilidade de implementação do Mecanismo de Inferência, na maneira escolhida para este trabalho específico.

As duas linhas de opções de que se dispõe são o uso de uma linguagem de programação e o uso de uma ferramenta específica para desenvolvimento de Sistemas Baseados em Conhecimento, conhecidas como *shells*. Quanto às linguagens de programação voltadas para a Inteligência Artificial, consideraram-se as seguintes possibilidades:

a) Prolog

O Prolog é uma linguagem lógica bastante difundida na área de Inteligência Artificial apresentando a grande vantagem de ter embutido um Mecanismo de Inferência (STERLING & SHAPIRO, 1986:94) (MONARD & NICOLETTI, 1995). A versão de Prolog disponível na época de início do desenvolvimento propriamente dito do código de programação era o Arity Prolog, interpretado e com grande limitação quanto à implementação de interface amigável. Para um sistema computacional pretensamente a ser fornecido *turnkey*, esta é uma grande limitação e razão suficiente para se abandonar a possibilidade de utilizar esta linguagem no desenvolvimento do Sistema Baseado em Conhecimento proposto.

b) C++

Cada vez mais é tendência o uso da linguagem C++ no desenvolvimento de sistemas baseados na Inteligência Artificial. No caso deste trabalho, observou-se que esta linguagem apresentava um desenvolvimento de interface gráfica muito complexa, além de não se conseguir tirar vantagem da estrutura da linguagem (orientada a objetos) devido à falta de apoio logístico e à necessidade de definições complexas inerentes à linguagem.

Recentemente foi adquirido a ferramenta computacional C++ Builder, o que facilita a geração da interface gráfica em C, principal limitação encontrada àquela época. Outros sistemas computacionais que estão sendo desenvolvidos atualmente junto ao Laboratório de CADCAE utilizam esta plataforma. No nosso caso, não se disponibilizou prazo de tempo viável para a tradução do trabalho já iniciado.

Relativamente às *shells*, por sua vez, consideraram-se as seguintes possibilidades:

c) CLIPS

Obteve-se uma versão *shareware* desta *shell*, a CLIPS, para ambiente *Unix like*, através da Internet. A versão disponibilizada à época do início do desenvolvimento do sistema ora proposto apresentava interface fraca e carecia de maior apoio logístico. Grandes dificuldades surgiram já na instalação do interpretador em uma *workstation*, quando se verificou que o CLIPS exigia outros módulos do sistema operacional para sua funcionalidade. Após uma série de tentativas, acabamos por abandonar a idéia de utilizar esta *shell*. Atualmente esta *shell* desenvolvida pela Agência Espacial Norte-Americana, NASA, se encontra na versão 6.0, podendo ser encontrada através da Internet (<http://www.jsc.nasa.gov/~clips/CLIPS.html>), já existindo um módulo adicional denominado FuzzyCLIPS (<http://ai.iit.nrc.ca/fuzzy/fuzzy.html>), em sua versão 6.02A, que trata com lógica difusa.

d) Nexpert

Sempre considerando-se as limitações impostas quanto a recursos de apoio, dispunha-se à época do início do desenvolvimento do sistema, de uma versão da *shell* Nexpert para Windows 3.1/3.11, versão 2.0, da empresa NeuronData. Este programa, teoricamente, tanto permitia o desenvolvimento de Sistemas Baseados em Conhecimento com uma interface bastante amigável quanto possibilitava a geração do programa executável, duas premissas básicas consideradas como imprescindíveis para o sistema proposto. Na prática, porém, verificaram-se grandes dificuldades nestes dois quesitos. A preparação de interface amigável apresentava dificuldades semelhantes às apresentadas por interpretadores da linguagem C++ e a geração do programa executável passava necessariamente pelo desenvolvimento de várias estruturas e módulos de definições em C, de difícil implementação. Este fatos motivaram igualmente o abandono desta solução. Apenas recentemente, sem prazo viável para a transferência de todo o trabalho já desenvolvido, relativo ao sistema computacional ora proposto, é que se tem conseguido contornar tais dificuldades. O Sistema Baseado em Conhecimento para Avaliação, em desenvolvimento em outro trabalho de tese de doutorado, está utilizando este recurso computacional. Com o avanço no uso desta ferramenta, porém, têm sido identificadas outras restrições, tal como o fato de esta *shell* não poder ser executada em ambiente Windows 95, o que se torna uma grande limitação atualmente.

Com base na situação acima apresentada à época do início do desenvolvimento deste sistema, e acrescentando-se a necessidade de se iniciar o mais rapidamente possível este desenvolvimento, dado o prazo limitado a ser obedecido, optou-se por iniciar o sistema utilizando-se a linguagem procedural Visual Basic. A idéia inicial era começar a desenvolver a interface com o usuário em Visual Basic e, posteriormente, integrá-la com o módulo de execução em C++. As razões que motivaram tal decisão foram:

- a) o Visual Basic apresenta grande facilidade de implementação de interface amigável a nível de usuário final, o que pode ser verificado na apresentação do Sistema Baseado em Conhecimento desenvolvido;
- b) facilidade de gerar o programa executável;
- c) transportabilidade do executável entre ambientes Windows 3.1/3.11 e Windows 95, confirmada na prática;
- d) linguagem orientada a objetos, permitindo a integração total com outras linguagens tais como C, C++ e FORTRAN, e
- e) comprovação de vários programas e jogos de computador que utilizam o Visual Basic como plataforma de desenvolvimento.

Com a continuidade das dificuldades em relação às outras ferramentas computacionais, com o encurtamento dos prazos finais e a grande facilidade encontrada no uso do Visual Basic, o protótipo do sistema computacional aqui proposto tomou corpo e resultou nesta versão 1.0 apresentada a seguir. O programa, que se propunha inicialmente um protótipo, atingiu tal ponto de desenvolvimento que, cada vez mais, seria altamente improdutivo abandonar-se todo o trabalho executado para reiniciar-se em outra plataforma. Há a proposta, porém, de geração de uma segunda versão deste Sistema Inteligente de Projeto Auxiliado por Computador utilizando-se outra linguagem de programação, tendendo-se para o C++ em conjunção com o C++ Builder.

3.3.3. Bases de Conhecimento

O Sistema Baseado em Conhecimento proposto manterá duas bases de conhecimento principais: uma base com os Princípios Físicos e outra com os Componentes existentes. Ambas as bases de conhecimento são gerenciáveis, isto é, permitem a inclusão, alteração e exclusão de informações pelo usuário do sistema computacional. Como todo Sistema Baseado em Conhecimento, este também é grandemente influenciado pela qualidade da

base de conhecimento que ele tem disponível. Em outras palavras, caso o cadastro dos Princípios Físicos esteja incompleto ou incorreto, o sistema computacional irá fornecer soluções incompletas ou incorretas.

Além disso, este fato, como já se disse inerente a todo Sistema Baseado em Conhecimento, pode fazer transparecer uma grande limitação do sistema ora proposto: a área de atuação do sistema computacional é diretamente limitada pela área de atuação dos Princípios Físicos cadastrados na base de conhecimento. Na verdade, por ser gerenciável, este fato torna o Sistema Baseado em Conhecimento proposto altamente flexível e abrangente, indo ao encontro destas mesmas características da Metodologia de Projeto Conceitual proposta. Caso se deseje utilizar o sistema em uma área não coberta pelos Princípios Físicos cadastrados, basta cadastrar-se novos Princípios Físicos relacionados àquela área do saber e o sistema estará pronto para prover soluções naquele campo.

O conhecimento relativo aos Princípios Físicos foi obtido basicamente junto a livros de referência, tais como TIPLER (1995), SEARS & ZEMANSKI (1978), SEARS et al (1990) e HALLIDAY et al (1996). Foi escolhida inicialmente a área da física pela razão de ser esta a área em que estão os princípios de solução para problemas de engenharia mecânica, escopo do Sistema Baseado em Conhecimento. Como já se disse, caso se deseje atuar em outras áreas, tais como medicina e economia, o usuário pode incluir outros princípios de solução dessas áreas, tais como princípios químicos, princípios biológicos e princípios econômicos.

Esta característica de sistema aberto apresentada pelo Sistema Baseado em Conhecimento proposto trás, porém, um possível problema: por ser gerenciável, pode ocorrer de o usuário excluir Princípios Físicos que seriam necessários para se obter uma solução para um certo problema, fazendo com que o sistema não re-solucione um problema já anteriormente solucionado.

Quanto à base de conhecimento de Componentes existentes, estes apresentam como propriedades os Princípios Físicos que englobam, o

tipo de entrada e de saída, herdados daqueles, e as suas características físicas, geométricas e econômicas, tais como rendimento apresentado pelo Componentes, peso e tamanho, custo e consumo de energia, por exemplo. Esta base de conhecimento é compatível com a base de conhecimento contida no Sistema Baseado em Conhecimento de Avaliação (assunto a cargo de outro trabalho de tese de doutorado), afim de poderem ambos sistemas trabalharem em seqüência e integrados.

Os Componentes cadastrados foram obtidos igualmente em livros de referência da área, tais como NIEMANN (1995), SHIGLEY (1984), FAIRES (1982), e DOBROVOLSKY (1966).

Por ser igualmente gerenciável, ou seja, permitir a inclusão, alteração e exclusão de Componentes, o sistema pode “crescer” no número de soluções identificadas para problemas propostos, com base no conhecimento retido pelo usuário. Isto garante que o Sistema Baseado em Conhecimento possibilita o uso de soluções já conhecidas para problemas semelhantes. Caso o usuário já conheça uma possível solução para dado problema, basta cadastrar-se na base de conhecimento os Componentes participantes daquela solução particular e o sistema passa a identificar a mesma com solução viável. Além disso, o sistema computacional proposto pode, por combinações de Componentes novos e antigos, vir a propor novas soluções não conhecidas pelo usuário, o que vem corroborar a característica da Metodologia de Projeto Conceitual proposta de estimular a criatividade. Entenda-se que o sistema computacional proposto não efetua uma atualização das soluções já encontradas automaticamente ao se incluir novos conhecimentos, mas sim que, ao se re-executar o sistema proposto para resolver algum problema já resolvido anteriormente, ele pode, com base nos novos conhecimentos, encontrar novas soluções.

Além destas duas bases de conhecimento principais, o sistema conta com uma base de Objetos, uma base de Verbos Técnicos, uma base de características para Objetos e uma base de características para ações.

Na base de Objetos, gerenciável, ficam armazenados os Objetos conhecidos, com suas caracterizações, tais como ruído gerado, peso, custo, perenidade, e tantos outros que forem cadastrados na base de características de Objetos. Estas características de Objetos são instanciadas utilizando-se lógica nebulosa, ou difusa. Desta forma, um mesmo Objeto pode apresentar peso “pesado” com uma certeza de 50% e peso “médio” com uma certeza de 20%, por exemplo (figura 3.8).

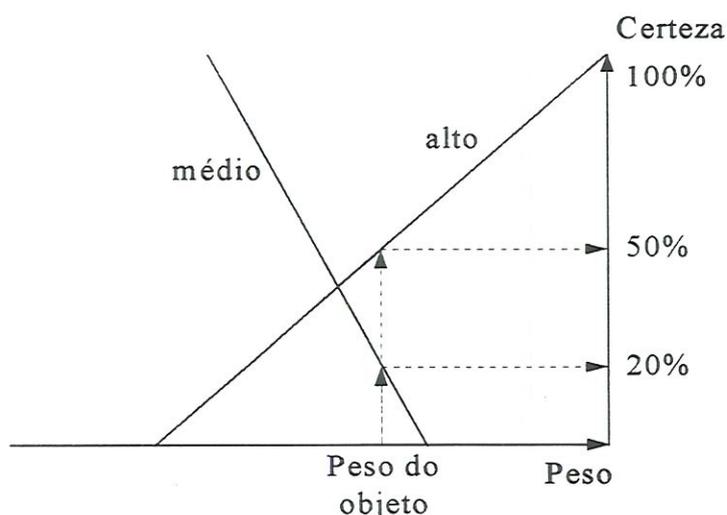


FIGURA 3.8. LÓGICA DIFUSA PARA DEFINIR A CARACTERÍSTICA PESO (EXEMPLO)

Esta facilidade do sistema proposto permite a obtenção de várias soluções para um mesmo problema com certezas, ou adequabilidades, diferentes e, mais que isto, permite a obtenção de uma mesma solução para problemas diferentes, com adequabilidades diversas. Esta é a base da lógica difusa (WATERMAN & KLAHR, 1986) (LUCAS & GAAG, 1991) (RUSSELL & NORVIG, 1995) (THURSTON & CARNAHAM, 1992) (MARKS II, 1994) (ZADEH & KACPRZYK, 1992) (WARS & FLOE, 1993).

Trabalhando conjuntamente com a base anterior, a base de características para Objetos mantém todas as características que podem ser instanciadas para cada um dos Objetos cadastrados. Esta base de

características para Objetos também guarda as regras de projeto relativas a elas, conforme será apresentado em seguida.

Duas outras bases que trabalham conjuntamente são a base de Verbos Técnicos, que conta com 550 Verbos Técnicos cadastrados, cada qual com até quatro sinônimos, e a base de características de ações. Os Verbos Técnicos e seus sinônimos foram levantados em dicionários, tais como FERREIRA (15ª edição), FERNANDES (1982a) e FERNANDES (1982b) e em trabalhos já citados, tais como FIOD (1993), ULMANN (1992) e ROTH (1985). Iguamente à base de características de Objetos, as características de ações também são instanciadas utilizando-se lógica difusa. Estas características são utilizadas tanto para caracterizar a ação desejada para atuar sobre o problema, sendo parte dos requisitos do problema, quanto para caracterizar os Componentes cadastrados. A base de características de ações também guarda parte das regras de projeto disponibilizadas pelo sistema computacional, editáveis pelo usuário. Este ponto será discutido em seguida.

Considerando-se a sintaxe das palavras, os Objetos podem ser entendidos como **substantivos**, os **verbos** como os próprios, as características de Objetos como **adjetivos** e as características de ações como **advérbios**.

3.3.4. Forma de Representação do Conhecimento e Mecanismo de Inferência

Conforme já citado anteriormente, deve-se idealmente escolher a forma de Representação do Conhecimento e do Mecanismo de Inferência que melhor representem a maneira com que o especialista modela mentalmente o conhecimento sobre o problema específico (DURKIN, 1994: 625).

A forma de Representação do Conhecimento utilizada pelo Sistema Baseado em Conhecimento proposto é a baseada em *Frames*, com armazenamento das *Regras de Produção* relativas àquele conhecimento específico no mesmo módulo da base de conhecimentos. A figura 3.9 apresenta a tela do módulo de cadastro de características de ações,

demonstrando claramente o uso de Frames. Esta figura, por sinal, é bastante similar à figura 2.5, utilizada como exemplo para este tipo de Representação do Conhecimento, na parte A deste trabalho. A forma de cadastro das características para Objeto é similar, como poderá ser verificado na seqüência.

FIGURA 3.9. FORMA DE REPRESENTAÇÃO DO CONHECIMENTO UTILIZADO NO SISTEMA BASEADO EM CONHECIMENTO - FRAMES E REGRAS DE PRODUÇÃO

A escolha deste tipo de Representação do Conhecimento baseou-se nas características próprias deste enfoque, que apresenta vantagens já colocadas na parte A deste trabalho e nas características do conhecimento que deve estar contido no sistema computacional proposto. Com o uso de Frames, facilita-se o cadastro e manutenção destes conhecimentos e agiliza-se a execução do Mecanismo de Inferência. Os conhecimentos contidos na base de conhecimento ficam organizados de acordo com o seu

tipo (Objetos, Verbos, características para Objeto, características para ação, Componentes, Princípios Físicos), mantendo-se uma relação natural entre eles. O uso de Regras de Produção tem seu motivo devido a facilitar igualmente a execução do Mecanismo de Inferência do sistema, uma vez que este é, numa visão simplificada, o mesmo procedimento mental utilizado pelo projetista de sistemas mecânicos durante a busca de soluções. O conjunto destas Regras de Produção, que podem ser editadas pelo usuário, compõe parte do conhecimento especialista de projeto apresentado pelo sistema ora proposto.

O Mecanismo de Inferência utilizado pelo sistema proposto é o de Forward Chaining, escolhido com base nas suas aplicações e vantagens inerentes apresentadas à seção 2.1.2., página 19 deste trabalho. Baseado na definição básica de que o sistema deverá propor tantas soluções quantas possíveis para um certo problema, afim de concorrer para o estímulo da criatividade do seu usuário, deve-se, partindo dos dados disponíveis, procurar-se ativas todas as regras existentes, no intuito de provar todas as viabilidades. Este é o procedimento básico do Forward Chaining, conforme também apresentado na parte A deste trabalho. Apesar desta escolha tornar o programa algo mais lento na sua execução, ela garante a obtenção do maior número possível de soluções para um certo problema.

Estas considerações vêm ao encontro das proposições de DURKIN (1994), quanto à aplicabilidade das formas de Representação do Conhecimento e do Mecanismo de Inferência, em relação ao tipo de problema tratado (figuras 3.10 e 3.11).

ALMEIDA, Francisco José de. *Sistematização e Automação do Ambiente de Projeto: o Enfoque da Sintaxe*. São Carlos, SP. Novembro de 1997.

Tipo do problema	Descrição
Controle	controlando o comportamento de sistemas visando especificações
Projeto	configurando objeto sob restrições
Diagnóstico	inferindo mal funcionamento de sistemas através da observação
Instrução	diagnosticando, depurando e corrigindo comportamento de estudo
Interpretação	inferindo descrição de situações através de dados
Monitoramento	comparando observações com expectativas
Planejamento	projetando ações
Predição	inferindo conseqüências de dadas situações
Prescrição	recomendando soluções para mal-funcionamento de sistemas
Seleção	identificando a melhor escolha de uma lista de possibilidades
Simulação	modelando a interação entre componentes de sistemas

FIGURA 3.10. TIPOS DE PROBLEMAS SOLUCIONADOS POR SISTEMAS ESPECIALISTAS (DURKIN, 1994: 17)

Tipo do problema	Mecanismo de Inferência		Representação do Conhecimento		
	Backward	Forward	Regras	Frames	Indução
Controle	baixo	alto	alto	médio	baixo
Projeto	baixo	alto	alto	baixo	baixo
Diagnóstico	alto	baixo	alto	médio	médio
Instrução	alto	médio	alto	médio	baixo
Interpretação	médio	alto	alto	baixo	alto
Monitoramento	baixo	alto	alto	médio	baixo
Planejamento	baixo	alto	alto	médio	baixo
Predição	médio	alto	alto	baixo	alto
Prescrição	médio	médio	alto	baixo	baixo
Seleção	alto	baixo	alto	baixo	médio
Simulação	baixo	alto	médio	alto	baixo

FIGURA 3.11. TIPO DE PROBLEMA VERSUS MECANISMO DE INFERÊNCIA E REPRESENTAÇÃO DO CONHECIMENTO (DURKIN, 1994: 628)

Assim, o Sistema Baseado em Conhecimento proposto contém as regras quanto à identificação de sistemas que podem compor uma possível solução (necessário para o Sistema Baseado em Conhecimento propor uma

solução com uma seqüência de sistemas). Estas regras são baseado nas Regras de Produção constantes dos Frames de características para Objeto e de características para ação, já apresentados. Por exemplo, da figura 3.9. pode-se observar que o sistema contém a seguinte regra de projeto, conhecimento oriundo do especialista da área:

*SE ruído máximo admissível é baixo
ENTÃO solução deve conter subsistema de abafar energia (ruído)*

Pode-se cadastrar regras de projeto semelhantes para todas as características para Objeto e para todas as características para ação cadastradas no sistema. Como este cadastro é aberto para o usuário, ele pode manipular o conhecimento de projeto do sistema e adaptá-lo facilmente ao seu conhecimento ou a conhecimento adicional obtido.

O sistema proposto também mantém informações quanto à subdivisão dos sistemas, uma das fases da Metodologia de Projeto proposta, até a obtenção das funções elementares. Este conhecimento também é gerenciável pelo usuário, que pode inserir no sistema seu próprio conhecimento de projeto. Conforme pode-se observar na seqüência, o gerenciamento deste conhecimento é efetuado no módulo de Cadastro de Funções Parciais. Este fato organiza o conhecimento de maneira natural e garante compatibilidade interna da base de conhecimento, o que concorre para facilitar o procedimento interno do Mecanismo de Inferência do sistema computacional proposto.

O sistema contém internamente regras para a combinação de Componentes cadastrados, baseadas na compatibilidade entre o tipo de saída que um Componente apresenta e a entrada que o Componente subsequente exige, o que garante a viabilidade física da solução identificada pelo sistema computacional. Este procedimento é já clássico na área de Sistemas Baseados em Conhecimento, sendo conhecido como a solução para o problema de

“Caminho em Grafos” (MONARD e NICOLETTI, 1993: 58). Exemplificando, um Componente que exija como entrada energia na forma mecânica só será combinado com um outro Componente que forneça como saída energia nesta forma (figura 3.12). Como as propriedades dos Componentes são gerenciáveis pelo usuário, que pode alterar os tipos de entrada e de saída de qualquer Componente cadastrado, novamente deve-se realçar o cuidado que o usuário deverá ter nas suas ações sobre a base de conhecimento do sistema (como já dito, a qualidade da resposta fornecida pelo sistema é diretamente proporcional à qualidade da sua base de conhecimento), e insistir-se na flexibilidade do sistema ora proposto.



FIGURA 3.12. REGRA PARA COMBINAÇÃO DE COMPONENTES

Com base nestas regras de projeto, o sistema computacional infere sobre o problema proposto e busca, de maneira automática, soluções para o mesmo, seguindo a Metodologia de Projeto proposta. Isto não significa que o sistema trabalha independentemente do usuário. Como pode-se observar na seqüência, o sistema permite a atuação e interferência do usuário em todas as fases da Metodologia de Projeto, criando um mecanismo de interação bastante flexível e poderoso. Por exemplo, com base na Função Global definida pelo usuário e nas regras de projeto contidas nos Frames de características para Objeto e de características para ação, o sistema sugere uma certa seqüência de Funções Parciais (fase 1 da metodologia proposta); o usuário visualiza esta seqüência proposta pelo sistema e pode incluir novas

Funções Parciais, alterar a posição entre as Funções Parciais propostas ou mesmo excluir Funções Parciais que ele julgue desnecessárias para aquele problema específico (figura 3.13). Este procedimento, inclusive, é o apresentado como característico de um Sistema Inteligente de Projeto Auxiliado por Computador, item 2.3 da parte A deste trabalho.

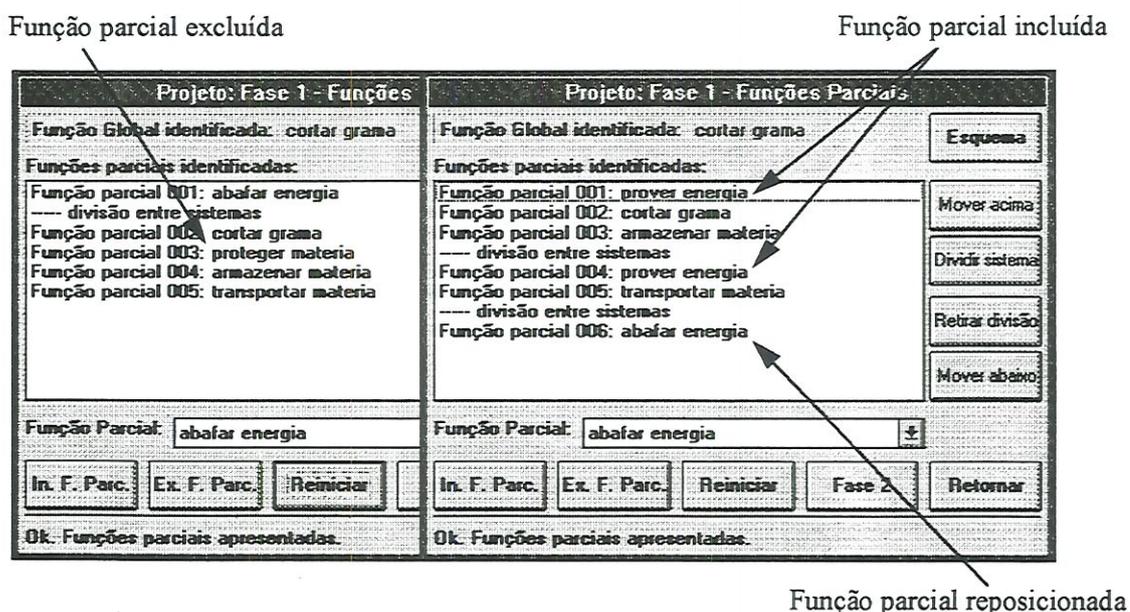


FIGURA 3.13. AÇÃO DO USUÁRIO SOBRE A SUGESTÃO DO SISTEMA COMPUTACIONAL

3.3.5. Lógica Difusa

Lógica Difusa, ou Fuzzy Logic, é, na definição de DURKIN (1994:364):

“A branch of logic that uses degrees of membership in sets rather than a strict true/false membership.”

Os primeiros sistemas baseados em lógica difusa foram propostos ainda na década de 20, através dos estudos de Lukasiewicz relativos à representação matemática de termos difusos tais como *alto*, *velho* ou *quente*.

Termos como estes são considerados difusos por não adaptarem-se à lógica de Aristóteles do *verdadeiro* ou *falso*.

A lógica difusa permite tratar-se com regras de produção do tipo SE a velocidade é baixa ENTÃO faça a aceleração alta. Percebe-se claramente que a definição do termo *baixa*, para a velocidade, e *alta*, para a aceleração, ultrapassa o limite do verdadeiro ou falso. Para tanto, é necessário lançar-se mãos de um conjunto difuso, ou fuzzy set, exemplificado na figura 3.8.

A lógica difusa tem grande aplicação em sistemas especialistas / sistemas baseados em conhecimento, uma vez que ela exprime de maneira muito mais natural o entendimento que o ser humano faz de um fato. Exemplificando, alguém pode achar, com toda certeza, que uma pessoa é alta se tiver mais de 2,00 m de altura, mas pode achar uma pessoa com 1,90 m igualmente alta, mas com uma certeza menor que cem por cento, digamos, noventa por cento. Esta aplicação é atualmente já bastante efetiva, já sendo utilizada em várias aplicações do dia-a-dia, tais como elevadores, para decidir em qual andar ele deve parar quando não em uso, com base no histórico e na projeção futura deste uso, e em máquinas de lavar roupas, para decidir a quantidade de água e sabão a ser colocado, com base na quantidade de roupas colocadas e no possível nível de sujeira que a roupa contém.

Especificamente em relação ao sistema computacional proposto, este calcula para cada solução encontrada a sua respectiva adequabilidade aos requisitos do problema, utilizando-se das informações armazenadas na sua base de conhecimentos através da lógica difusa. O cálculo desta adequabilidade baseia-se nas equações propostas por DURKIN (1994:348-350), abaixo reproduzidas.

$$\alpha_{solucao} = \prod_i^n \alpha_i$$

[equação 3.1]

onde $\alpha_{solucao}$ é a adequabilidade da solução

α_i é a adequabilidade de cada componente i contido na solução

n é o número de componentes contidos na solução

$$\alpha_{\text{componente}} = \prod_j^m \alpha_j$$

[equação 3.2]

onde $\alpha_{\text{componente}}$ é a adequabilidade do componente

α_j é a certeza relativa à característica j do componente

m é o número de características desejadas (requisitos) para a solução

A certeza relativa a uma característica qualquer de um componente também qualquer é calculada da seguinte forma: inicialmente consideremos que um componente i possui uma característica *peso* instanciada; consideremos ainda que os termos relativos à característica *peso* estão definidos de acordo com a figura 3.8, já apresentada; consideremos finalmente que foi definido para o problema que a solução deve apresentar, como característica desejada, um *peso médio*. Neste caso, baseado na figura 3.8, o sistema computacional conclui que aquele componente i apresenta a característica de *peso médio* com uma certeza de 20%.

O mesmo procedimento é utilizado para se definir as certezas relativas a cada característica j de cada componente i participante de cada solução encontrada pelo sistema computacional. No caso de um componente não apresentar determinada característica desejada instanciada, o sistema computacional deduz automaticamente uma certeza igual a zero para aquela característica daquele componente. Em outras palavras, o sistema computacional deduz que o componente não atende àquela característica desejada.

3.3.6. Desenvolvimento do Sistema Inteligente de Projeto Auxiliado por Computador

No desenvolvimento deste sistema tem sido aplicadas e verificadas todas as considerações já apresentadas, quanto à abrangência do sistema, às facilidades disponíveis no programa, ao levantamento de

conhecimento relacionados, à implementação e verificação de uma base de conhecimento, à implementação e verificação de um processo de raciocínio, à disponibilização de uma interface amigável e à escolha e implementação de um método de projeto.

Após a definição do escopo do Sistema Baseado em Conhecimento, definição esta automática e imediata, uma vez que o objetivo primordial para o desenvolvimento do Sistema Baseado em Conhecimento é a implementação da Metodologia de Projeto Conceitual proposta, após a aquisição do conhecimento a estar contido no sistema computacional, já discutida, e após a definição da forma de Representação do Conhecimento e do Mecanismo de Inferência a ser utilizado no sistema computacional, igualmente já discutida, passou à fase de desenvolvimento do Sistema Baseado em Conhecimento.

Conforme proposição de DURKIN (1994:41), a implementação do Sistema Baseado em Conhecimento desenvolveu-se alternadamente, entre a geração dos módulos e a alimentação da base de conhecimento. Por ter-se definido que o sistema teria sua base de conhecimento aberta, ou seja, totalmente gerenciável pelo usuário, foi necessário o desenvolvimento de alguns módulos de gerenciamento desta base de conhecimento não previstos no projeto inicial do sistema, tais como, por exemplo, o módulo de Cadastro de Funções Parciais, o módulo de Pesquisa de Princípios Físicos, cujo objetivo é facilitar a pesquisa nesta base de dados (como pode-se verificar na apresentação do sistema desenvolvido em seguida) e o módulo de Pesquisa de Componentes, com função idêntica aplicada à base de Componentes, além da inclusão de algumas funções em módulos existentes ou previstos inicialmente, tais como, por exemplo, a função de pesquisa de Princípios Físicos passíveis de serem incluídas após um Princípio Físico específico, no módulo de cadastro de Componentes (conforme apresentado em seguida).

Assim, foi implementado um protótipo do Sistema Baseado em Conhecimento, com uma base de conhecimento já montada. A montagem desta base de conhecimento consistiu de:

a) Criação da base de Princípios Físicos (por exemplo Lei de Hooke - relação tensão-deformação):

Os Princípios Físicos serão utilizados para encontrar-se as soluções do problema proposto. As soluções do problema proposto são uma combinação em seqüência de Princípios Físicos.

b) Criação do Catálogo de Componentes:

Conjunto de Componentes reais que podem ser utilizados pelo usuário para solucionar o problema proposto. Cada Componente engloba um ou mais Princípios Físicos já cadastrados (por exemplo mola, que engloba o Princípio Físico Lei de Hooke). Cada Componente tem cadastradas uma ou mais características, quantificadas, relativas à ação que ele pode fazer (por exemplo roda pode transportar algo com *velocidade baixa*, com *ruído alto*, com *distância longa*).

As soluções do problema proposto são uma combinação seqüencial de Componentes disponíveis.

c) Cadastro de Características de Objetos (por exemplo peso, tamanho, perenidade e outros):

Estas características serão utilizadas na fase de definição do problema proposto, limitando-se as soluções para aquelas que efetivamente solucionem o problema obedecendo todos os requisitos informados.

Neste cadastro também estarão parte das regras de projeto incluídas no sistema computacional. Por exemplo, para qualquer Objeto que apresente a característica de ser perene, deverá haver uma função integrante da solução relativa à proteção deste Objeto.

d) Cadastro de Objetos:

Cada Objeto possui uma ou mais características já cadastradas, instanciadas de valores específicos (por exemplo, grama, com característica peso leve).

e) Cadastro de Características de Verbos (ou de ações) (por exemplo ruído admissível, potência necessária, velocidade admissível, velocidade necessária, e outros):

Cada característica de Verbo cadastrada é instanciada em relação à sua quantificação (por exemplo, ruído admissível: alto é um ruído com valor entre 50 e 100, médio é um ruído com valor entre 25 e 75 e baixo é um ruído com valor entre 0 e 50).

Estas características serão utilizadas na fase de definição do problema proposto, obedecendo as mesmas definições já apresentadas para as características dos Objetos.

Neste cadastro, igualmente, estarão parte das regras de projeto incluídas no sistema computacional. Por exemplo, para qualquer ação que apresente a necessidade de ter ruído baixo, deverá haver uma função na solução, relativa a abafar o ruído gerado.

f) Cadastro de Verbos Técnicos, com sinônimos (por exemplo, agrupar com sinônimos ajuntar e reunir):

Para cada Verbo incluído pelo usuário, o sistema computacional automaticamente inclui também uma Função Parcial. Por exemplo, ao se incluir o Verbo *elevantar* e relacioná-lo à grandeza *matéria*, o sistema automaticamente inclui a Função Parcial *elevantar matéria*.

Opcionalmente, o usuário pode iniciar o sistema completando a base de dados já existente, cadastrando e/ou alterando quaisquer dos tipos de dados acima. Esta possibilidade está prevista em todos os módulos de gerenciamento da base de conhecimento do programa.

O conjunto de bases de dados / bases de conhecimentos que o sistema computacional manipula pode ser esquematizado conforme segue.

Arquivo de Princípios Físicos

Denominação: ICAD.pfi (Princípios Físicos)

Estrutura:

Primeiro registro: quantidade de princípios físicos cadastrados

Segundo registro em diante, contendo os campos:

Denominação do princípio físico

Função elementar relacionada

Grandeza que causa o princípio físico

Grandeza que o princípio físico gera

Descrição do princípio físico

Grandeza que o princípio físico manipula

Arquivo de Componentes

Denominação: ICAD.cat (CATálogo)

Estrutura:

Primeiro registro: quantidade de componentes cadastrados

Segundo registro em diante, contendo os campos:

Denominação do componente

Quantidade de princípios físicos cobertos pelo componente

Quantidade de características do componente

Lista de identificação dos princípios físicos cobertos

Lista de características instanciadas do componente

Arquivo de Características de Objetos

Denominação: ICAD.cao (**CA**racterística de **OB**jeto)

Estrutura:

Primeiro registro: quantidade de características cadastradas

Segundo registro em diante, contendo os campos:

Denominação da característica

Termo relacionado a valores elevados da característica

Termo relacionado a valores médios da característica

Termo relacionado a valores menores da característica

Valores relacionados à distribuição da certeza

Função parcial relacionada à característica

Arquivo de Objetos

Denominação: ICAD.obj (**OB**Jeto)

Estrutura:

Primeiro registro: quantidade de objetos cadastrados

Segundo registro em diante, contendo os campos:

Denominação do objeto

Quantidade de características relacionadas ao objeto

Lista de características, com respectivas instanciações

Arquivo de Características de Verbos

Denominação: ICAD.cav (**CA**racterística de Verbo)

Estrutura:

Primeiro registro: quantidade de características cadastradas

Segundo registro em diante, contendo os campos:

Denominação da característica

Termo relacionado a valores elevados da característica

Termo relacionado a valores médios da característica

Termo relacionado a valores menores da característica

Valores relacionados à distribuição da certeza

Função parcial relacionada à característica

Arquivo de Verbos

Denominação: ICAD.ver (**VER**bo)

Estrutura:

Primeiro registro: quantidade de objetos cadastrados

Segundo registro em diante, contendo os campos:

Denominação do verbo

Sinônimos do verbo, até quatro

Grandeza relacionada ao verbo, por default

Ainda acompanhando a metodologia de DURKIN (1994), o sistema ia sendo testado, iterativamente a cada nova inclusão de conhecimento ou de um módulo novo, verificando-se a validade do trabalho, passo a passo, e corrigindo-se encaminhamentos, nos casos necessários.

Alguns pontos que devem ser realçados, relativos ao desenvolvimento do Sistema Baseado em Conhecimento, são os relacionados à geração de módulos que manipulam esquemas gráficos. Conforme discutido anteriormente, é muito mais interessante para o usuário de um Sistema Inteligente de Projeto Auxiliado por Computador poder trabalhar com esquemas gráficos nas fases englobadas por uma metodologia sistemática de projeto. Esta possibilidade é disponibilizada em várias fases da aplicação da Metodologia de Projeto Conceitual proposta, conforme será verificado a seguir.

Segundo a metodologia de DURKIN (1994), este trabalho escrito representa a documentação gerada a respeito do sistema computacional e de sua implementação.

Finalizando a aplicação da metodologia para desenvolvimento de Sistemas Baseados em Conhecimento, resta a fase de manutenção. Apesar de extensamente testado e de ter recebido várias modificações cujas necessidades foram levantadas durante esses testes, pode-se considerar que o Sistema Baseado em Conhecimento aqui apresentado deverá entrar na fase de manutenção propriamente dita apenas após estar disponibilizado para o público em geral. O retorno que os potenciais usuários fornecerão permitirá que se verifique quais funções ou características devem sofrer manutenção. Esta manutenção poderá ser de ordem corretiva, objetivando retirar-se algum erro observado durante o uso do sistema, ou de ampliação, objetivando incluir funções cuja carência tenha sido sentida pelos usuários.

3.4. Utilização do Sistema Inteligente de Projeto Auxiliado por Computador - Manual de Uso

3.4.1. Requisitos de *software* e *hardware* para a execução do Sistema Inteligente de Projeto Auxiliado por Computador

Alguns recursos mínimos são necessários para a execução do Sistema Inteligente de Projeto Auxiliado por Computador desenvolvido. Estes

recursos mínimos podem ser divididos em requisitos de *software* e em requisitos de *hardware*.

a) Requisitos de *Software*

O programa exige computador com sistema operacional DOS 6.0 ou superior e ambiente Windows 3.1/3.11 instalados. O sistema também pode ser executado sob sistema operacional Windows 95. Ambos devem estar definidos com resolução de tela de 800x640. Em resoluções menores, parte das janelas de execução poderão ficar ocultas, dificultando o uso do programa. O programa não aproveita resoluções de tela maiores que a sugerida. Como o programa foi desenvolvido em ambiente 16 *bits*, ele não executa em ambientes de 32 *bits*, como por exemplo, em sistema operacional Windows NT e Unix *like*.

b) Requisitos de *Hardware*

O programa deve ser executado em microcomputador com processador Intel 486 ou Pentium, ou similar. O programa pode ser executado em microcomputador com processador Intel 386, ou similar, mas apresentará baixo desempenho.

Outros recursos necessários são:

- 8 MBytes de RAM, sugerindo-se 16 MBytes para melhor desempenho, principalmente do ambiente de suporte, Windows 3.1/3.11 ou Windows 95;
- disco rígido para instalação do sistema com 3 MBytes de espaço disponível;
- *drive* para disquete de 3.1/2" de alta densidade, ou seja, para 1.44 MBytes, para recebimento do disquete de instalação;
- placa de vídeo SuperVGA preferencialmente colorida;
- monitor SuperVGA, preferencialmente colorido, podendo ser executado com monitor Preto e Branco normalmente;
- teclado, e
- dispositivo apontador reconhecível pelo Windows, podendo funcionar também apenas com teclado.

3.4.2. Instalação do programa e ativação através do Windows

Para a instalação do Sistema Inteligente de Projeto Auxiliado por Computador basta inserir-se o disquete de instalação no *drive* do microcomputador e executar-se o programa A:\INSTALA.EXE. Este programa irá criar um diretório no disco rígido, sugerindo o C:\ICAD, e copiará todos os arquivos necessários para lá. O usuário pode alterar o *drive* que identifica o seu disco rígido, bem como o diretório de destino (figura 3.14). Foi utilizado o programa *shareware* Instant Install, desenvolvido por Graphics Dynamics, Inc., obtido através da Internet (www.tucows.com).

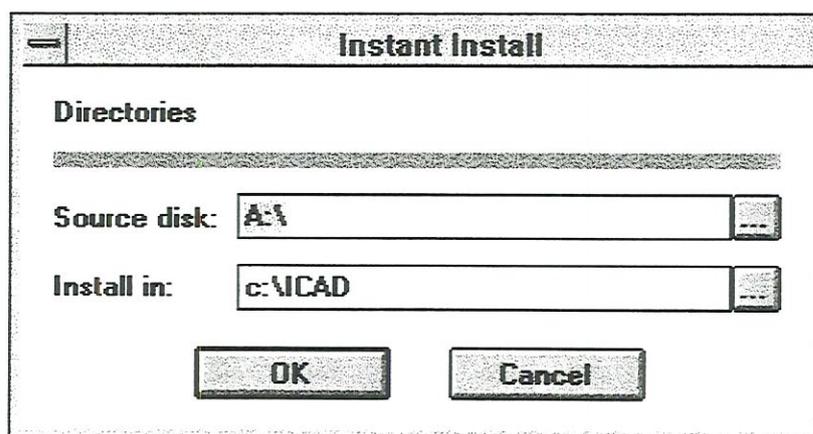


FIGURA 3.14. OPÇÕES DO INSTALADOR DO PROGRAMA

Após instalado o programa, sua ativação é feita pressionando-se duas vezes consecutivamente o botão do dispositivo apontador quando este estiver sobre o ícone referente ao programa no Gerenciador de Programas, no caso do Windows 3.1/3.11 (figura 3.15) ou através do Menu Iniciar do Windows 95 (figura 3.16).

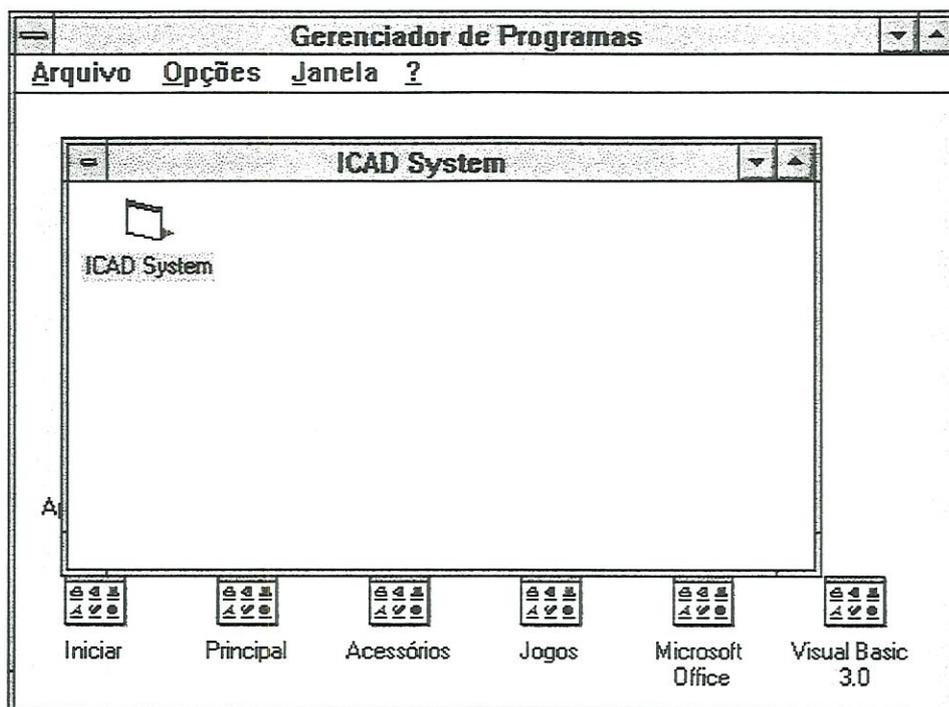


FIGURA 3.15. ACESSO AO PROGRAMA ATRAVÉS DO WINDOWS 3.1/3.11

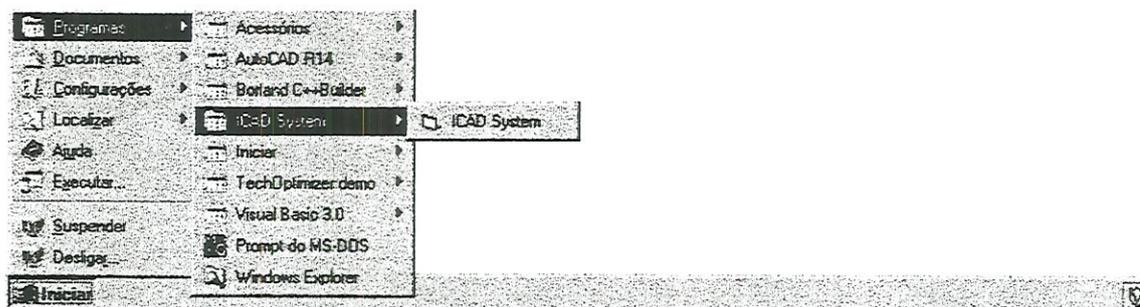


FIGURA 3.16. ACESSO AO PROGRAMA ATRAVÉS DO WINDOWS 95

O programa será carregado para a memória do computador e se visualizará uma tela de apresentação (figura 3.17). Concomitantemente, será apresentada a janela principal do sistema, com um menu de opções e a janela para auxílio *on-line* (figura 3.18). Após alguns segundos, a tela de apresentação será desativada automaticamente.



FIGURA 3.17. TELA DE APRESENTAÇÃO DO SISTEMA INTELIGENTE DE PROJETO AUXILIADO POR COMPUTADOR

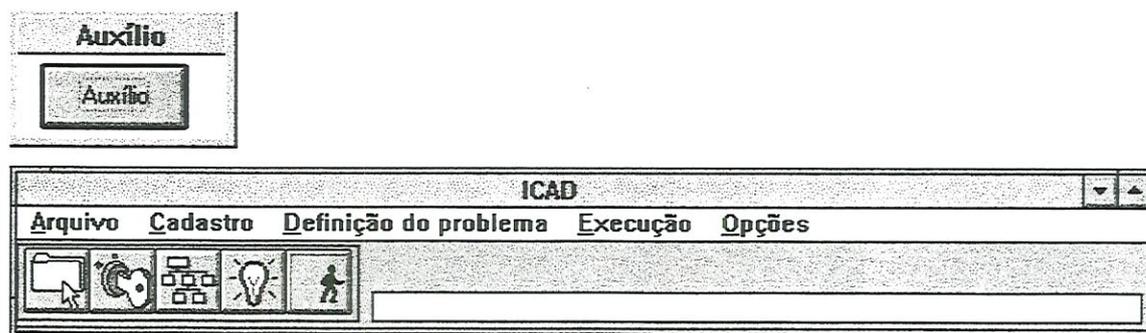


FIGURA 3.18. JANELA PRINCIPAL E JANELA DE AUXÍLIO ON-LINE

3.4.3. Aplicação da Metodologia de Projeto Conceitual Proposta

a) Identificação do Problema

Uma vez estando ativada a janela principal do programa, e de acordo com a Metodologia de Projeto Conceitual proposta, o usuário pode iniciar por identificar o problema a ser solucionado, em termos de um binômio verbo-objeto. Com isto, se garante a abstração do mesmo em termos genéricos, segundo a Metodologia de Projeto utilizada. Permite-se a

caracterização tanto do Objeto a receber a ação quanto da ação (ou Verbo) propriamente dita. Isto significa, em outras palavras, definir-se o escopo do problema de projeto a ser resolvido pelo programa computacional, considerando-se todas as restrições do problema tais como rapidez necessária, ruído admissível, custo admissível (características da ação) e peso, tamanho, fragilidade do Objeto (características do Objeto). Todas as características podem ser gerenciadas pelo próprio usuário, que as pode incluir, excluir e alterar suas propriedades.

Para tanto, o usuário deve escolher o menu **Definição do problema** na janela principal, e dentro deste, o comando **identifica Verbo (ação)**. O usuário também pode utilizar na barra de ferramentas o ícone respectivo (figura 3.19).

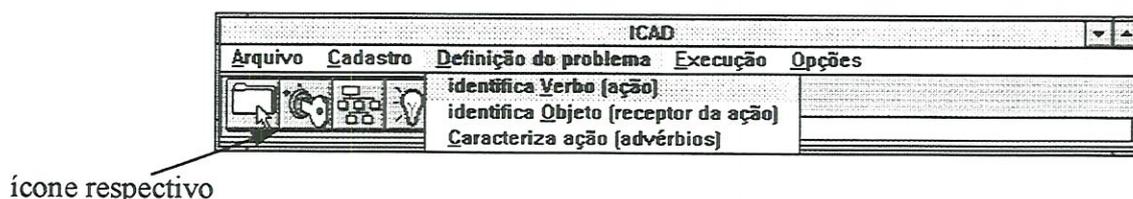


FIGURA 3.19. ACESSO AOS MÓDULOS DE DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Uma vez ativada a janela de Identificação do Verbo do Projeto (ação), caso se trate de um projeto já iniciado, serão apresentados os Verbos já escolhidos. Caso se trate de um projeto novo inicia-se por escolher um Verbo Técnico que exprima o problema (figura 3.20). O Verbo é escolhido entre os já cadastrados.

Identificação do Verbo do Projeto (ação)

Verbo:	cortar	1o. sinônimo:
	coordenar	2o. sinônimo:
	copiar	3o. sinônimo:
	correr	4o. sinônimo:
	corrigir	
	corroer	
	cortar	
	cozer	
	cravar	

Escolhidos	Pendentes

Digite o verbo e pressione <Pesquisar>

FIGURA 3.20. ESCOLHENDO UM VERBO QUE EXPRESSA A AÇÃO DESEJADA

Em seguida, através do botão **Pesquisar**, inicia-se o processo de refinamento da escolha. Para especificar melhor o seu problema, o usuário dispõe da opção de escolher sinônimos do Verbo escolhido, afim de tornar mais específica a ação desejada (por exemplo agrupar no sentido de ajuntar e não no sentido de reunir). O programa irá apresentar os sinônimos cadastrados para o Verbo escolhido. Marcando-se os quadros relativos aos sinônimos que expressem melhor a idéia do problema, utiliza-se o botão **Continuar** para continuar o processo. A cada vez que se escolhe um Verbo novo da relação de sinônimos, este Verbo passa a integrar a lista de Verbos escolhidos e os seus sinônimos vão para a lista de Verbos pendentes (figura 3.21).

Identificação do Verbo do Projeto (ação)

Verbo: 1o. sinônimo: dividir
2o. sinônimo: separar
3o. sinônimo: interromper
4o. sinônimo: obstruir

Escolhidos	Pendentes
cortar	dividir interromper obstruir separar

Ok. Sinônimos do verbo apresentados. Marque os desejados.

FIGURA 3.21. REFINANDO A ESCOLHA DO VERBO DO PROJETO

Este processo continua até que o usuário não escolha mais nenhum sinônimo ou que todos os Verbos pendentes já tenham sido apresentados, ou seja, até tornar pesquisa redundante (figura 3.22).

Identificação do Verbo do Projeto (ação)

Verbo: 1o. sinônimo:
2o. sinônimo:
3o. sinônimo:
4o. sinônimo:

Escolhidos
cortar
separar

Pendentes

Ok. Processo terminado. Verbos identificados.

FIGURA 3.22. PROCESSO DE ESCOLHA DO VERBO PARA O PROJETO FINALIZADO

A qualquer momento, durante o refinamento da escolha do Verbo do problema, ou após o processo de refinamento terminado, pode-se reiniciar todo o procedimento, através do botão **Reiniciar**. Ao final do processo de refinamento, o usuário pode retornar para a janela principal, através do botão **Retornar**, ou passar diretamente para a janela de Identificação do Objeto do Projeto (receptor da ação), utilizando o botão **Id.Objeto** (figura 3.22)

Na janela de Identificação do Objeto do Projeto (receptor da ação), caso se trate de um projeto já iniciado, o programa apresentará o Objeto escolhido e as características relacionadas a ele. Caso se trate de um projeto novo, inicia-se escolhendo um Objeto entre os cadastrados na base do programa, através do botão **Escolher**. Caso se deseje apenas verificar as características de cada Objeto cadastrado, pode-se fazê-lo através do botão **Ler** (figura 3.23).

FIGURA 3.23. ESCOLHENDO UM OBJETO PARA O PROJETO

O Objeto escolhido herda todas as características e instanciações já cadastradas para ele. Caso deseje, porém, o usuário pode particularizar o Objeto específico para o seu projeto. Por exemplo, o Objeto grama cadastrado apresenta como característica custo baixo; o Objeto grama específico para o projeto em estudo pode ter como característica custo médio. Para tanto, deve-se escolher a característica a alterar da lista de características do Objeto, marcar-se a nova instanciação desejada e efetuar a alteração, através do botão **Alterar**. As instanciações das características do Objeto do projeto são feitas qualitativamente. Através de lógica difusa, o programa quantificará as mesmas nas fases posteriores. Também é possível particularizar-se o Objeto do projeto incluindo-se novas características para ele, através do botão **In.Caract**, ou excluindo-se características herdadas, através do botão **Ex.Caract** (figura 3.24).



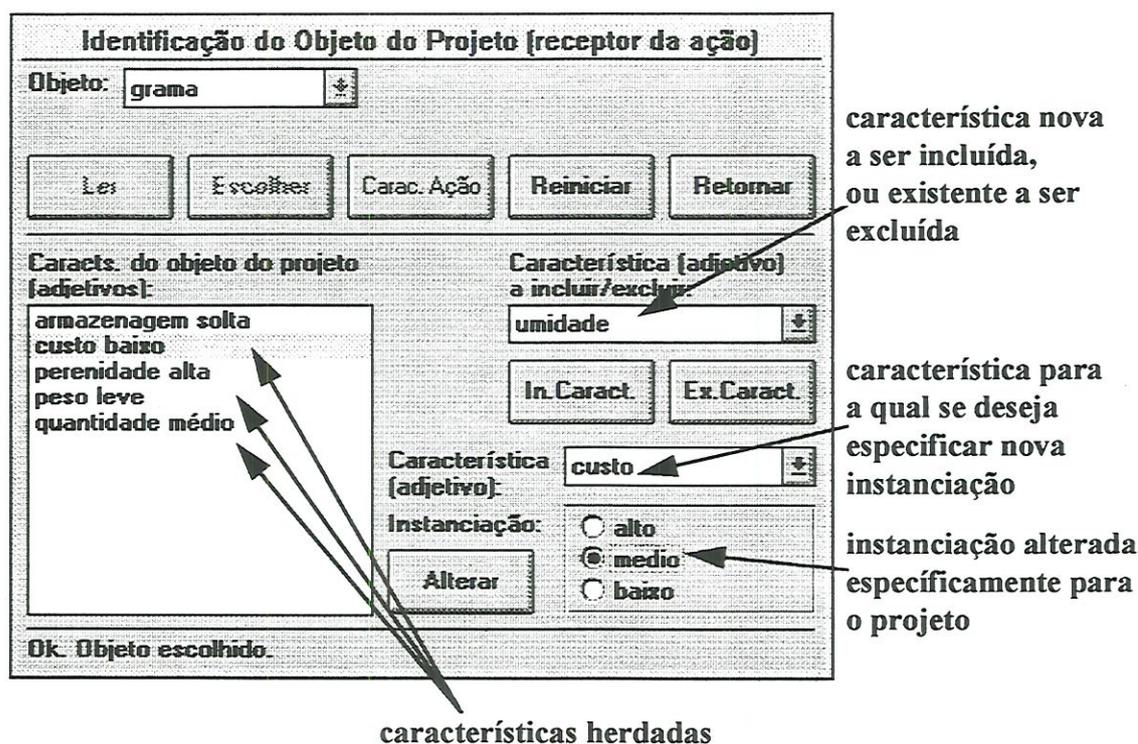


FIGURA 3.24. VISÃO GERAL DA JANELA DE IDENTIFICAÇÃO DO OBJETO DO PROJETO

A instanciação das características do Objeto do projeto é uma das partes da lista de requisitos, prevista em algumas metodologias de projeto citadas em capítulos anteriores.

A qualquer momento durante o processo, ou após este terminado, pode-se reiniciar todo o procedimento, através do botão **Reiniciar**. Ao final do processo, o usuário pode retornar para a janela principal, através do botão **Retornar**, ou passar diretamente para a janela de Caracterização da Ação do Projeto (advérbios), utilizando o botão **Carac.Ação** (figura 3.24).

Na janela de Caracterização da Ação do Projeto (advérbios), caso se trate de um projeto já iniciado, o programa apresentará as características para a ação já escolhidas e instanciadas. Caso se trate de um projeto novo, inicia-se incluindo características para a ação do projeto (advérbios), dentre as características para ação cadastrados no programa (figura 3.25), através do botão **In.Caract**. Cada característica incluída deve ser classificada como necessária ou como desejável, marcando-se a opção respectiva (figura 3.26).

Caso não se opte por nenhuma classe, o programa automaticamente considera a característica incluída como necessária. Todas as características necessárias devem ser satisfeitas pelas soluções identificadas pelo programa. As características desejáveis têm por objetivo qualificar as soluções encontradas, ou seja, todas as soluções satisfazem às características necessárias, e as melhores soluções são as que obedecem o maior número de características desejáveis.

Caracterização da Ação do Projeto (advérbios)	
Característica a incluir/excluir (advérbio):	Verbos (ação):
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> beleza mínimo exigível aceleração mínimo exigível agressão ao ma máximo admissível beleza mínimo exigível confiabilidade mínimo exigível controle mínimo exigível custo máximo admissível dirigibilidade mínimo exigível distância mínimo exigível </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">cortar</div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 5px;"> Reiniciar Retornar </div>
	Instanciação:
	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>
Características necessárias da ação do projeto:	Alterar
<div style="border: 1px solid black; height: 40px;"></div>	
Características desejáveis da ação do projeto:	
<div style="border: 1px solid black; height: 40px;"></div>	
Verifique a ação do projeto (verbos) e clique sobre a função desejada.	

FIGURA 3.25. ESCOLHENDO A CARACTERÍSTICA PARA A AÇÃO

Caracterização da Ação do Projeto (advérbios)

Característica a incluir/excluir (advérbio): ruído máximo admissível	Verbos (ação): cortar
<input checked="" type="radio"/> necessária <input type="radio"/> desejável	
<input type="button" value="In. Caract."/> <input type="button" value="Ex. Caract."/> <input type="button" value="Execução"/> <input type="button" value="Reiniciar"/> <input type="button" value="Retornar"/>	
Característica da ação (advérbio): ruído máximo admissível	Instanciação: <input type="radio"/> alto <input checked="" type="radio"/> médio <input type="radio"/> baixo
Características necessárias da ação do projeto: controle mínimo exigível controlado custo máximo admissível médio distância mínimo exigível longe ruído máximo admissível indefinido	
Características desejáveis da ação do projeto: beleza mínimo exigível bela confiabilidade mínimo exigível média limpeza mínimo exigível média rendimento mínimo exigível indefinido	
<input type="button" value="Alterar"/>	
Ok. Característica transferida para a ação do projeto.	

Instanciação para a característica identificada →

Características incluídas e instanciadas →

Característica incluída e não instanciada →

FIGURA 3.26. VISÃO GERAL DA JANELA DE CARACTERIZAÇÃO DA AÇÃO DO PROJETO

Após ter-se incluído todas as características necessárias e desejáveis para o projeto, deve-se instanciá-las, escolhendo-se uma a uma e definindo-se sua instanciação, através da marcação da instanciação desejada e utilizando-se o botão **Alterar**. Esta instanciação é feita qualitativamente. Através de lógica difusa, o programa quantificará as mesmas nas fases posteriores. O programa também permite excluir-se características anteriormente incluídas para a ação do projeto, através do botão **Ex.Caract**, reiniciar o processo através do botão **Reiniciar** e retornar à janela principal, através do botão **Retornar**. Após a inclusão e instanciação das características para a ação do projeto, o usuário pode também ativar diretamente a execução da busca das soluções, através do botão **Execução** (figura 3.26).

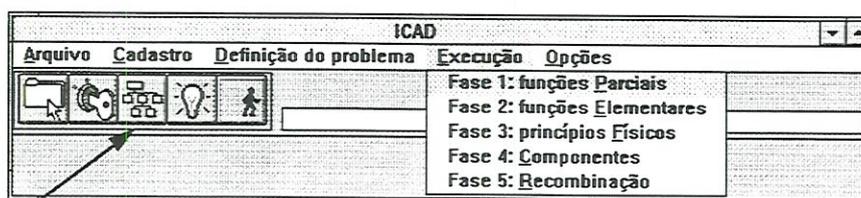
A instanciação das características da ação do projeto também é uma das partes da lista de requisitos, prevista em algumas metodologias de projeto citadas em capítulos anteriores.

Após esta fase, o programa tem definida a função geral do problema específico, na forma verbo-objeto. Desta maneira, se garante a abstração do problema e a completa especificação do mesmo.

b) Execução da Metodologia de Projeto Conceitual: Fases 1 a 5

Na seqüência, de acordo com a Metodologia de Projeto Conceitual proposta, o programa interativamente executa a separação do problema em subfunções (Funções Parciais) e depois em Funções Elementares, identifica os Princípios Físicos relacionados e sugere uma solução para o problema proposto na forma de Componentes reais, fazendo ainda a recombinação dos mesmos, afim de se prover maior leque de soluções para avaliação posterior. Neste processo, o sistema aplica o conhecimento de projeto contido na sua base de conhecimento, gerenciável pelo usuário.

Para tanto, o usuário deve escolher o menu **Execução** na janela principal, e dentro deste, o comando **fase 1: funções Parciais**. O usuário também pode utilizar na barra de ferramentas o ícone respectivo (figura 3.27).



ícone respectivo

FIGURA 3.27. ACESSO AOS MÓDULOS DE BUSCA DE SOLUÇÕES

Uma vez ativada a janela da Fase 1 - Funções Parciais, o programa sugere automaticamente uma primeira divisão da Função Global identificada nas fases anteriores, em várias Funções Parciais. O programa também divide a seqüência de Funções Parciais sugerida em vários subsistemas, de acordo com a grandeza com que cada Função Parcial identificada trabalha (figura 3.28). As grandezas consideradas pelo programa são energia, sinal e matéria, similarmente ao sugerido por vários autores já citados. Caso o projeto já tenha passado por esta fase, o programa apresenta a seqüência final de Funções Parciais, que pode ter sido alterada pelo usuário. Com finalidade informativa, o programa apresenta a Função Global identificada na parte superior desta janela.

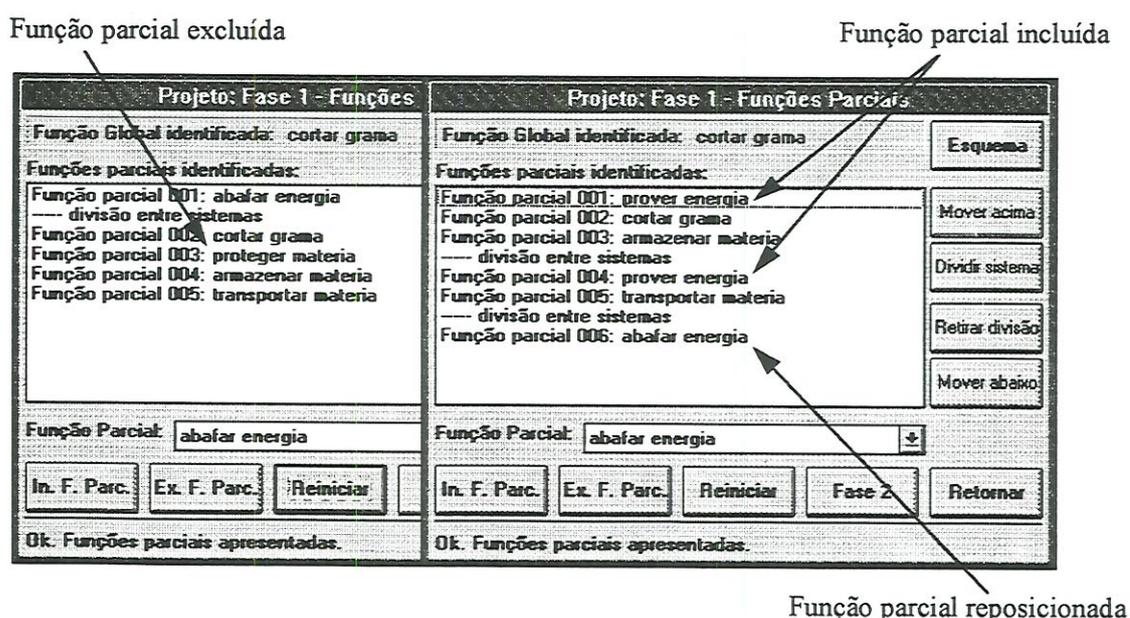


FIGURA 3.28. FASE 1 - FUNÇÕES PARCIAIS

O usuário pode interagir com o programa, ao incluir Funções Parciais já cadastradas, através do botão **In.F.Parc**, excluir Funções Parciais indesejadas ou consideradas desnecessárias, através do botão **Ex.F.Parc.**,

reiniciar a identificação automática de Funções Parciais, através do botão **Reiniciar** e retornar à janela principal, através do botão **Retornar** (figura 3.28).

O usuário também pode alterar a posição relativa das Funções Parciais identificadas, através dos botões **Mover acima** e **Mover abaixo**. Para tanto, ele deve antes marcar uma Função Parcial da lista de Funções Parciais identificadas e, então movê-la acima ou abaixo. O usuário pode, finalmente, dividir a seqüência de Funções Parciais em subsistemas, através do botão **Dividir sistema**, indicando a posição onde deverá ser inserida uma divisão entre sistemas, ou unir dois subsistemas, retirando uma divisão, através do botão **Retirar divisão**; neste caso, o usuário deverá marcar a divisão que deseja retirar (figura 3.28).

Afim de facilitar a visualização da seqüência de Funções Parciais que satisfaçam o problema proposto, o usuário pode acessar um esquema com estas funções, através do botão **Esquema** (figura 3.29).

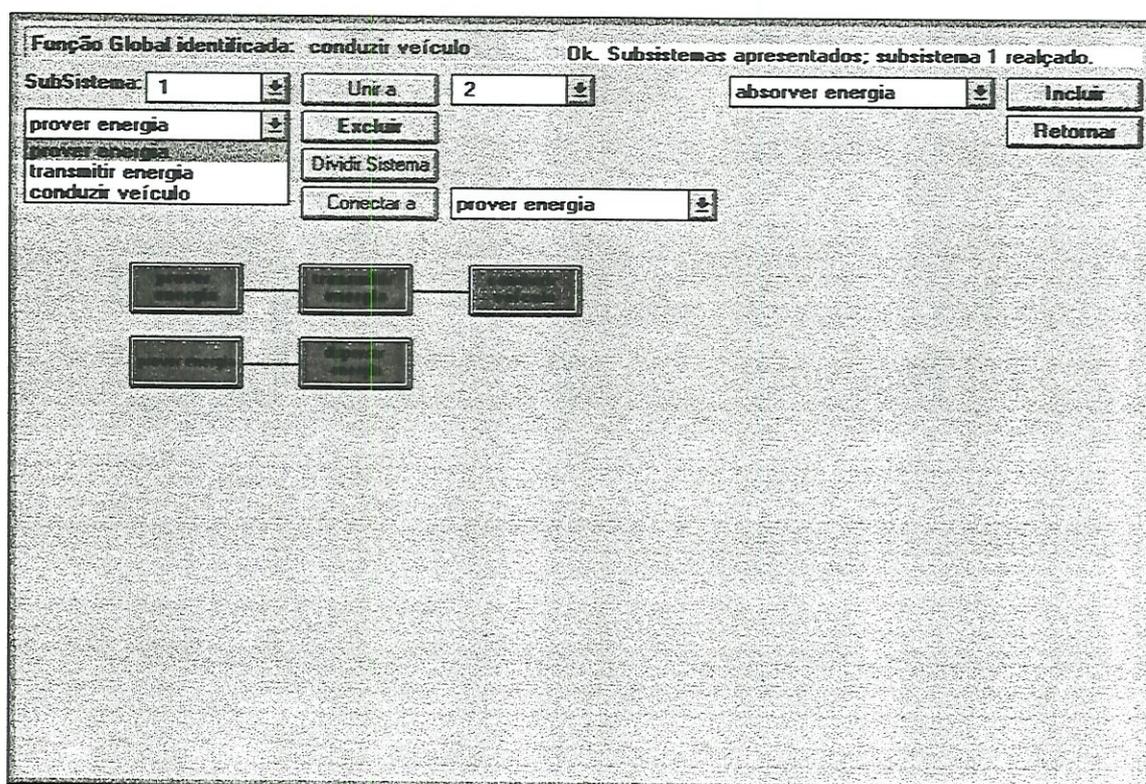


FIGURA 3.29. ESQUEMA DE FUNÇÕES PARCIAIS

Após definir uma seqüência satisfatória de Funções Parciais, o usuário pode ativar a fase 2 - Funções Elementares, através do botão **Fase 2**. Caso um ou mais subsistemas não apresente a Função Parcial “prover potência” no seu início, ao se acessar os botões **Fase 2** e **Retornar**, o programa sugere incluir-se esta Função Parcial. Isto é devido ao entendimento do Sistema Baseado em Conhecimento que todo subsistema físico deve ter uma fonte de energia para seu funcionamento. Caso deseje, o usuário pode não concordar com a sugestão do programa, cancelando a inclusão.

Uma vez ativada a janela da Fase 2 - Funções Elementares, o programa identifica automaticamente as Funções Elementares relacionadas a cada Função Parcial anteriormente definida. Esta relação é gerenciada pelo usuário, através da janela de Cadastro de Funções Parciais, apresentada a seguir. Caso uma ou mais Funções Parciais não tenham Funções Elementares relacionadas, o programa lista-as no quadro *Funções parciais não atendidas*: (figura 3.30) e emite um aviso.

Caso todas as Funções Parciais tenham sido satisfeitas, o programa apresenta as Funções Elementares identificadas. Caso haja mais de um subsistema na seqüência de Funções Parciais, o usuário escolhe aquele que deseja visualizar através do quadro *Subsistema número*:. Caso o projeto já tenha passado por esta fase, o programa apresenta a seqüência final de Funções Elementares, que pode ter sido alterada pelo usuário. Com finalidade informativa, o programa apresenta a Função Global identificada na parte superior desta janela. O usuário também pode interagir com o programa incluindo novas Funções Elementares em qualquer um dos subsistemas, através do botão **In.F.Elem.**, excluir Funções Elementares consideradas desnecessárias, através do botão **Ex.F.Elem.**, e alterar a posição relativa entre as Funções Elementares, através dos botões **Mover acima** e **Mover abaixo**; nestes casos, deve-se antes marcar a Função Elementar desejada dentre as apresentadas na lista de Funções Elementares identificadas (figura 3.30).

Projeto: Fase 2 - Funções Elementares

Função Global identificada: cortar grama Imagem

Funções parciais não atendidas:

SubSistema número: Mover acima

Funções elementares identificadas:

F.elem.001: transformar energia (da f.parc. prover energia)
F.elem.002: separar materia (da f.parc. cortar grama)
F.elem.003: acumular materia (da f.parc. armazenar materia)

Mover abaixo

Função elementar:

Ok. Funções elementares deste subsistema apresentadas.

FIGURA 3.30. FASE 2 - FUNÇÕES ELEMENTARES

O usuário pode também, visualizar uma imagem com a seqüência de Funções Elementares para cada subsistema, através do botão **Imagem**. Os símbolos utilizados são os propostos por ROTH (1982), apresentados por FIOD (1993) (figura 3.31).

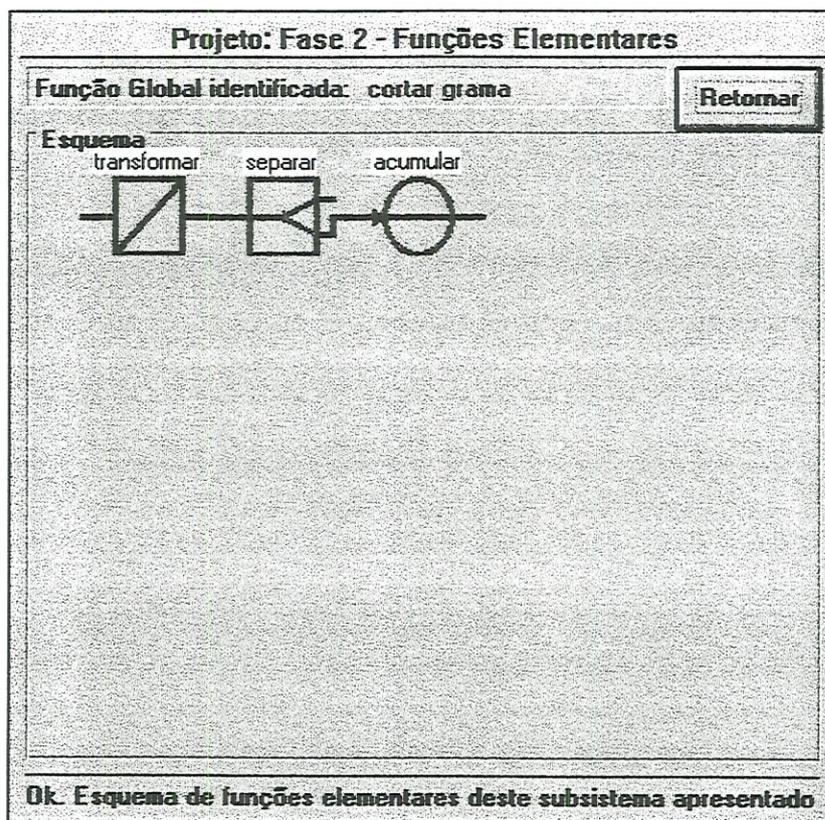


FIGURA 3.31. IMAGEM DA SEQÜÊNCIA DE FUNÇÕES ELEMENTARES

Finalmente, o usuário pode reiniciar o processo de identificação de Funções Elementares, através do botão **Reiniciar**, retornar à janela principal, através do botão **Retornar** e ativar a janela da fase 3 - Princípios Físicos, através do botão **Fase 3** (figura 3.30).

Uma vez ativada a janela da Fase 3 - Princípios Físicos, o programa identifica automaticamente os Princípios Físicos que têm como função cada uma das Funções Elementares anteriormente identificadas. Esta relação é gerenciada pelo usuário, através da janela de Cadastro de Princípios Físicos, apresentada a seguir. Caso uma ou mais Funções Elementares não tenham nenhum Princípio Físico a elas relacionado, o programa lista-as no quadro *Funções elementares não atendidas*: (figura 3.32) e emite um aviso.

Projeto: Fase 3 - Princípios Físicos

Função Global identificada: cortar grama

Funções elementares não atendidas:

Subsistema número:

Função elementar:

Princípios físicos identificados:

Campo de Dipolo de uma Espira

Campo Elétrico

Campo Magnético deslocamento/força

Campo Magnético radiação/força

Conservação de Energia Mecânica cinética/potencial

Conservação de Energia Mecânica potencial/cinética

Equação de Bernoulli pressão/velocidade

Equação de Bernoulli velocidade/pressão

Lei de Biot-Savart

Lei de Faraday deslocamento/corrente

Lei de Faraday radiação/força

Lei de Hooke deslocamento/força

Ok. Princípios físicos para a função elementar apresentados.

FIGURA 3.32. FASE 3 - PRINCÍPIOS FÍSICOS

Caso todas as Funções Elementares tenham sido satisfeitas, o programa apresenta a relação de todos os Princípios Físicos identificados que se relacionam com cada Função Elementar anteriormente definida. Neste ponto, é montada a Matriz Morfológica da solução: cada coluna se relaciona a uma Função Elementar, e em cada linha é apresentado um Princípio Físico relacionado (figura 3.33).

ALMEIDA, Francisco José de. *Sistematização e Automação do Ambiente de Projeto: o Enfoque da Sintaxe*. São Carlos, SP. Novembro de 1997.

transformar energia	separar matéria	acumular matéria	reduzir energia
Conservação de Energia Mecânica	Lei de Coulomb	armazenagem	Efeito Doppler
Lei de Hooke	ruptura		Lei de Boyle e Mariotte
Equação de Bernoulli	ruptura (calor)		Lei de Poiseuille
Princípio de Arquimedes			Lei dos Gases Ideais
Segunda Lei de Newton			Lei do Resfriamento de Newton
Primeira Lei da Termodinâmica			Refração
Campo Elétrico			Campo Magnético (Transformador)
Lei de Ohm			Reflexão
Lei de Joule			Interferência Destrutiva ondas
Campo Magnético			Interferência Destrutiva luz
Lei de Biot-Savart			Interferência Destrutiva
Campo de Dipolo de uma Espira Solenóide			isolamento mecânico
Lei de Faraday			
Segunda Lei de Newton			

FIGURA 3.33. EXEMPLO DE MATRIZ MORFOLÓGICA GERADA PELO PROGRAMA

Caso haja mais de um subsistema na seqüência de Funções Parciais, o usuário escolhe aquele que deseja visualizar através do quadro *Subsistema número*:. Caso haja mais de uma Função Elementar no subsistema escolhido, o usuário escolhe aquela que deseja visualizar através do quadro *Função elementar*:. Caso o projeto já tenha passado por esta fase, o programa apresenta a relação final de Princípios Físicos para cada Função Elementar, que pode ter sido alterada pelo usuário. Com finalidade informativa, o programa apresenta a Função Global identificada na parte superior desta janela. O usuário também pode interagir com o programa excluindo Princípios Físicos da relação apresentada, através do botão **Ex.P.Físico**. O usuário

também pode acessar informações relativas a cada Princípio Físico relacionado, através do botão **Lê P.Físico** (figura 3.32).

Finalmente, o usuário pode reiniciar o processo de identificação de Princípios Físicos, através do botão **Reiniciar**, retornar à janela principal, através do botão **Retornar** e ativar a janela da fase 4 - Componentes, através do botão **Fase 4** (figura 3.32).

Uma vez ativada a janela da Fase 4 - Componentes, o programa identifica automaticamente os Componentes que utilizam os Princípios Físicos anteriormente identificados e monta todas as seqüências de Componentes viáveis. Esta relação é gerenciada pelo usuário, através da janela de Cadastro de Componentes, apresentada a seguir. Especificamente, o programa monta uma segunda Matriz Morfológica, contendo em cada linha de cada coluna um Componente que utiliza um dos Princípios Físicos de cada coluna. A seqüência de Componentes é montada considerando-se a compatibilidade entre o tipo de saída de um Componente e o tipo de entrada do Componente subsequente.

Caso o programa não consiga montar nenhuma seqüência viável de Componentes, ele apresenta a seqüência parcial e informa ao usuário desta inviabilidade. Para todas as seqüências de Componentes montadas, o programa calcula a adequabilidade respectiva. Esta adequabilidade, como já dito anteriormente, considera a relação entre as características desejadas para a solução e as características que cada Componente escolhido apresenta. Como o programa utiliza lógica nebulosa, a adequabilidade da solução é dada continuamente, entre 0 e 100%.

Caso um ou mais Componentes não tenha relacionado a si uma ou mais características definidas como necessária para a solução, o programa lista estas características não satisfeitas no quadro respectivo (figura 3.34). Neste caso, a adequabilidade da solução é calculada como zero. Ou seja, se o programa não sabe se um Componente satisfaz ou não uma certa característica necessária, ele considera, por *default*, que o Componente não a satisfaz.

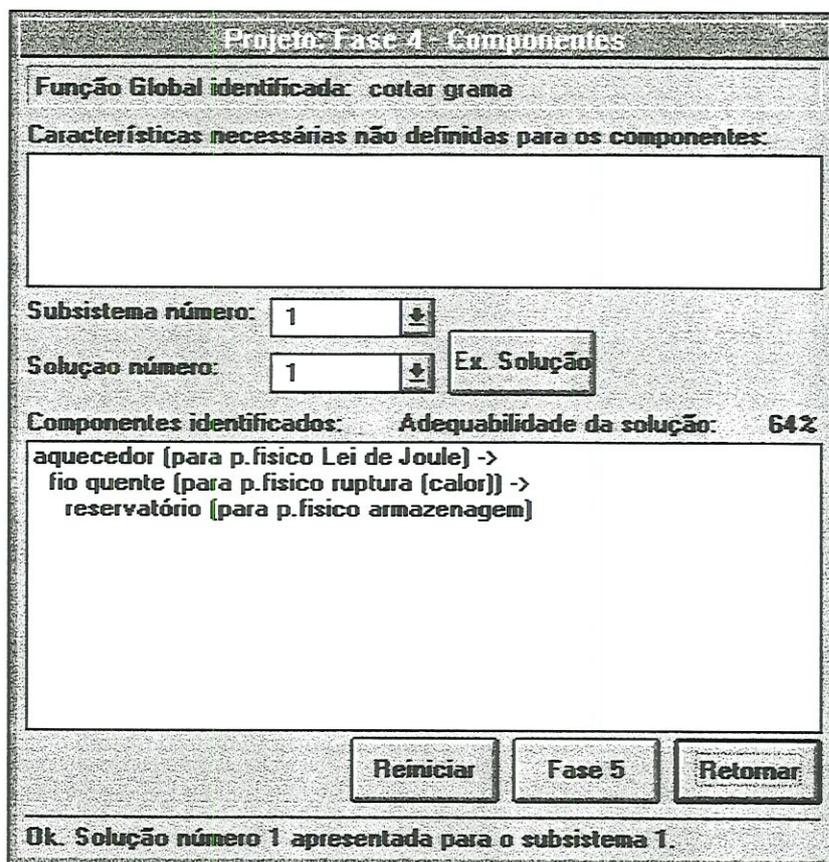


FIGURA 3.34. FASE 4 - COMPONENTES

Apresentadas as soluções, caso haja mais de um subsistema na seqüência de Funções Parciais, o usuário escolhe aquele que deseja visualizar através do quadro *Subsistema número:*. Caso haja mais de uma solução para o subsistema escolhido, o usuário escolhe aquela que deseja visualizar através do quadro *Solução número:*. Caso o projeto já tenha passado por esta fase, o programa apresenta as soluções anteriormente definidas. Com finalidade informativa, o programa apresenta a Função Global identificada na parte superior desta janela. O usuário também pode interagir com o programa excluindo uma ou mais soluções que ele considere inviáveis ou indesejadas, através do botão **Ex.Solução** (figura 3.34).

Finalmente, o usuário pode reiniciar o processo de identificação de soluções, através do botão **Reiniciar**, retornar à janela principal, através do botão **Retornar** e ativar a janela da fase 5 - Recombinação de Componentes, através do botão **Fase 5** (figura 3.34).

Uma vez ativada a janela da Fase 5 - Recombinação de Componentes, o programa apresenta todas as soluções cujas adequabilidades calculadas são maiores que zero, com as recombinações de posições entre Componentes possíveis (figura 3.35). Desta forma, consegue-se um maior número de soluções possíveis, estimulando a criatividade do projetista, ao propor soluções ou combinações novas (figura 3.36).

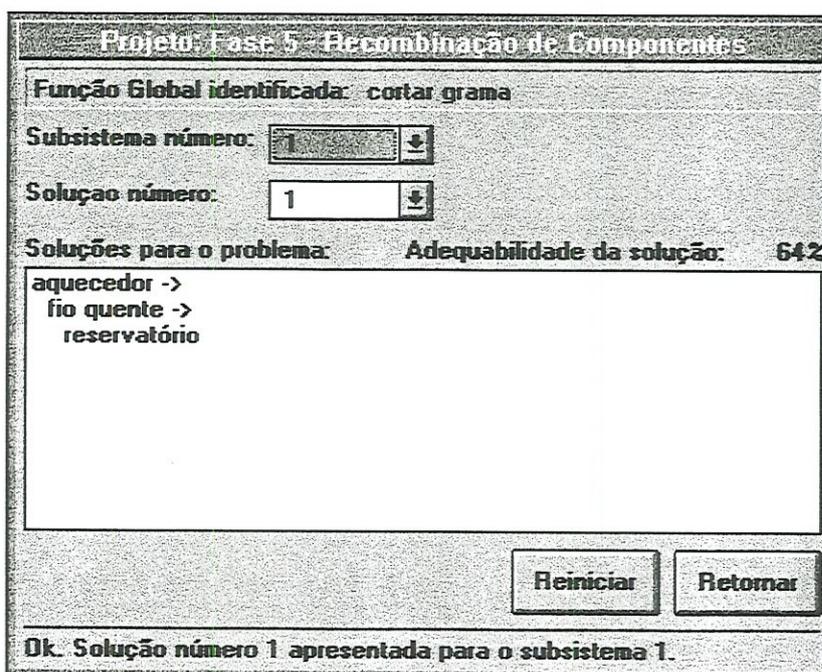


FIGURA 3.35. FASE 5 - RECOMBINAÇÃO DE COMPONENTES

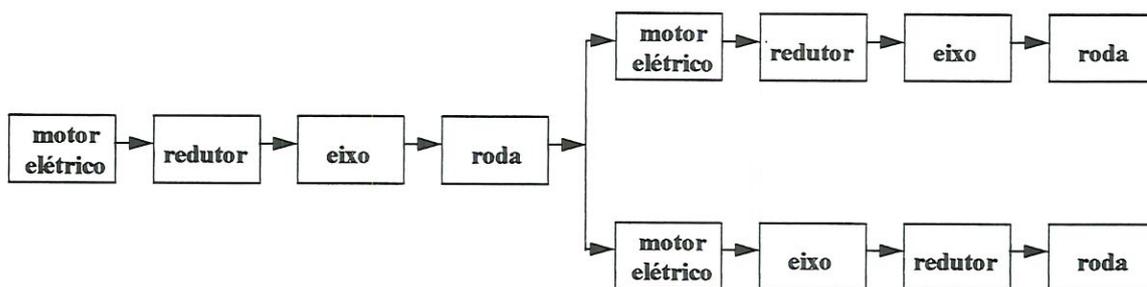


FIGURA 3.36. RECOMBINAÇÃO DE COMPONENTES GERANDO DUAS SOLUÇÕES

Finalmente, o usuário pode reiniciar o processo de recombinação de Componentes, através do botão **Reiniciar** ou retornar à janela principal, através do botão **Retornar** (figura 3.35). Fecha-se assim a Metodologia de Projeto Conceitual proposta.

3.4.4. Gerenciamento da Base de Conhecimentos

Este item foi deixado para o final da apresentação do sistema computacional, não por sua menor importância, mas querendo significar que o usuário poderá utilizar o sistema computacional sem a necessidade de gerenciar a base de conhecimentos existente. Em outras palavras, o sistema computacional é disponibilizado pronto para uso e com conhecimentos suficientes em seu bojo para sua execução completa. Claro é que, como já citado várias vezes, o escopo do sistema é limitado pelo escopo dos conhecimentos contidos na base de conhecimentos, a saber da área de projeto mecânico.

Os módulos de gerenciamento da base de conhecimentos são, conforme a figura 3.37, Cadastro de Verbo (ação), Cadastro de característica de Ações (advérbio), Cadastro de característica de Objeto (adjetivo), Cadastro de Objeto (receptor da ação), Cadastro de Função parcial, Cadastro de Princípio físico e, por último, Cadastro de Componente. Estes são acessados através do menu **Cadastro** da janela principal.

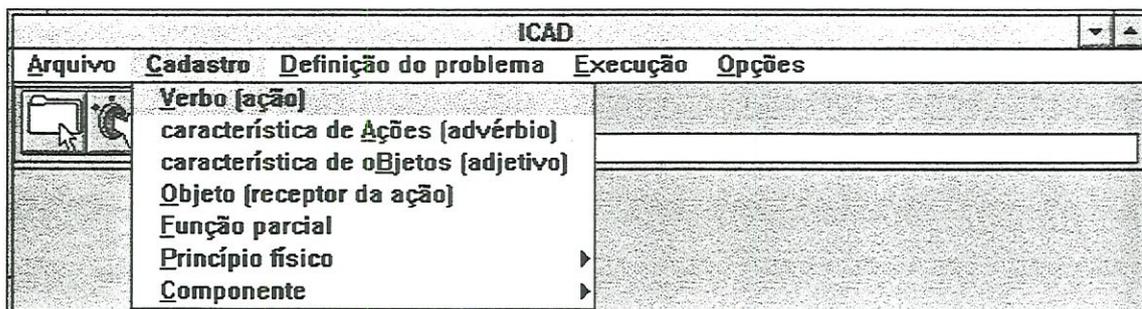


FIGURA 3.37. ACESSO AOS MÓDULOS DE GERENCIAMENTO.

Através do módulo de Cadastro de Verbo (ação), o usuário pode ler os sinônimos de Verbos já cadastrados, através do botão **Ler**, incluir novos Verbos e seus sinônimos, através do botão **Incluir**, alterar sinônimos de Verbos já cadastrados, através do botão **Alterar** e excluir qualquer Verbo já cadastrado, através do botão **Excluir**. O retorno à janela principal se dá através do botão **Retornar** (figura 3.38).

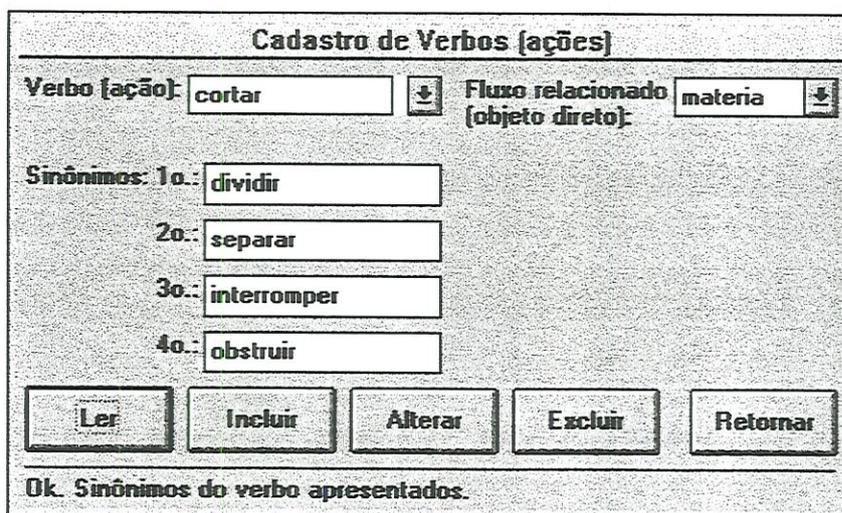


FIGURA 3.38. JANELA DE CADASTRO DE VERBOS (AÇÕES)

Através do módulo de Cadastro de Característica de Ações (advérbios), o usuário pode ler as propriedades de características de ações já cadastradas, através do botão **Ler**, incluir novas características de ações, através do botão **Incluir**, alterar propriedades de características de ações já cadastradas, através do botão **Alterar** e excluir qualquer característica de ações já cadastrada, através do botão **Excluir**. O retorno à janela principal se dá através do botão **Retornar** (figura 3.39).

FIGURA 3.39. JANELA DE CADASTRO DE CARACTERÍSTICAS DE AÇÕES (ADVÉRBIOS)

Tem-se total liberdade no cadastro das propriedades das características de ações, podendo-se definir os termos (palavras) que identificarão as instanciações da característica, por exemplo para a característica manubilidade, definiram-se os termos alta, média e baixa, a função-certeza para cada instanciação, por exemplo, manubilidade alta é definida para valores entre 39 (com certeza igual a 0%) e 100 (com certeza

Similarmente ao módulo anterior, tem-se total liberdade no cadastro das propriedades das características de Objetos, podendo-se definir os termos (palavras) que identificarão as instanciações da característica, a função-certeza para cada instanciação e o tipo da característica. Este tipo pode ser “utilizar o termo maior”, como por exemplo, perenidade alta, ou “utilizar o termo menor”, como por exemplo estabilidade instável, e será igualmente utilizado na definição de uma possível regra de projeto.

Também neste módulo, pode-se definir livremente regras de projeto, como por exemplo, *SE perenidade do objeto for alta ENTÃO a solução deve conter a função parcial proteger matéria*.

Através do módulo de Cadastro de Objetos (receptores da ação), o usuário pode ler as características de Objetos já cadastrados, através do botão **Ler**, incluir novos Objetos, através do botão **Incluir**, e excluir qualquer Objeto já cadastrado, através do botão **Excluir**. Ele pode também incluir características para Objetos já cadastrados, através do botão **In.Caract.** ou excluir características para Objetos, através do botão **Ex.Caract.**; nestes casos, deve-se informar qual é a característica a incluir ou a excluir no quadro respectivo. Pode-se também alterar instanciações de características de Objetos já incluídas, através do botão **Alterar**; para tanto, deve-se indicar a característica a sofrer a alteração e indicar-se a instanciação desejada. As instanciações que são apresentadas para cada característica escolhida no quadro *Instanciação*: são as relativas aos termos cadastrados no módulo de Cadastro de Características de Objetos (adjetivos). O retorno à janela principal se dá através do botão **Retornar** (figura 3.41).

Cadastro de Objetos (receptores da ação)

Objeto: ▾

Características do objeto (adjetivos):

armazenagem solta
custo baixo
perenidade alta
peso leve
quantidade médio

Característica (adjetivo) a incluir/excluir:

▾

Característica (adjetivo): ▾

Instanciação:

acondicionada
 comum
 solta

Ok. Características do objeto apresentadas.

FIGURA 3.41. JANELA DE CADASTRO DE OBJETOS (RECEPTORES DA AÇÃO)

Através do módulo de Cadastro de Funções Parciais, o usuário pode ler as Funções Elementares relacionadas a Funções Parciais já cadastradas, através do botão **Ler**, incluir novas Funções Parciais, através do botão **Incluir**, e excluir qualquer Função Parcial já cadastrada, através do botão **Excluir**. As Funções Parciais são definidas na forma de um binômio verbo-objeto, sendo que pode-se escolher qualquer Verbo entre os já cadastrados, bem como qualquer Objeto entre as características de Objetos (adjetivos) também já cadastradas. Pode-se também relacionar uma ou mais Funções Elementares para cada Função Parcial cadastrada. As Funções Elementares disponíveis são definidas internamente ao programa, constando das combinações entre as doze funções básicas apresentadas em FIOD (1993) e as três grandezas relacionadas em PAHL & BEITZ (1992). As Funções Elementares são incluídas para uma certa Função Parcial através do botão **In.F.Elem.** e excluídas através do botão **Ex.F.Elem.** Pode-se também alterar a ordem relativa entre as Funções Elementares de uma Função Parcial,

através dos botões **Mover acima** e **Mover abaixo**. O retorno à janela principal se dá através do botão **Retornar** (figura 3.42).

FIGURA 3.42. JANELA DE CADASTRO DE FUNÇÕES PARCIAIS

A definição das Funções Elementares ligadas a cada Função Parcial define como a seqüência de Funções Parciais da solução será desmembrada em Funções Elementares (fase 2 da Execução).

Através do módulo de Cadastro de Princípios Físicos, o usuário pode ler as propriedades relacionadas a Princípios Físicos já cadastrados, através do botão **Ler**, incluir novos Princípios Físicos, através do botão **Incluir**, alterar as propriedades de qualquer Princípio Físico já cadastrado, através do botão **Alterar**, e excluir qualquer Princípio Físico já cadastrado, através do

botão **Excluir**. O retorno à janela principal se dá através do botão **Retornar** (figura 3.43).

A janela de software intitulada "Cadastro de Princípios Físicos" apresenta os seguintes campos e controles:

- Princípio Físico:** Campo de texto com o valor "Campo Elétrico" e uma seta para baixo.
- Função elementar:** Campo de texto com o valor "transformar" e uma seta para baixo, seguido por um campo de texto com o valor "energia" e uma seta para baixo.
- Causa:** Campo de texto com o valor "radiação eletro-magnética" e uma seta para baixo.
- Conseqüência:** Campo de texto com o valor "força" e uma seta para baixo.
- Descrição:** Área de texto contendo o texto: "Uma carga elétrica sob ação de um campo elétrico recebe uma força proporcional à sua carga e ao campo elétrico. (Tipler, 1985: 603/616)".
- Botões de ação: "Ler", "Incluir", "Alterar", "Excluir" e "Retornar".
- Barra de status: "Ok. Caracterização do princípio físico apresentada."

FIGURA 3.43. JANELA DE CADASTRO DE PRINCÍPIOS FÍSICOS

Cada Princípio Físico cadastrado deve ter relacionada a ele um tipo de Causa (tipo de grandeza que "entra"), um tipo de Conseqüência (tipo de grandeza que "sai") e uma Função Elementar (o que o Princípio Físico "faz"). Além disso, como informativo, o usuário pode cadastrar uma breve descrição de cada Princípio Físico (figura 3.43).

Afim de facilitar a consulta à base de Princípios Físicos cadastrados, desenvolveu-se o módulo de Pesquisa de Princípios Físicos. Através deste módulo, o usuário pode levantar todos os Princípios Físicos que atendem a uma ou mais das seguintes condições: tipo específico de Causa, escolhida no quadro *Causa*; tipo específico de Conseqüência, escolhido no quadro *Conseqüência*; e Função Elementar a ele relacionada, escolhida no quadro *Função elementar*. O retorno à janela principal se dá através do botão **Retornar** (figura 3.44).

Pesquisa de Princípios Físicos

Função elementar:

Causa: Conseqüência:

Princípio Físico	Função Elementar	Causa	Conseqüência
armazenagem	acumular	materia deslocamento	deslocamento
Atrito	mudar_direção	energia força	força
Campo de Dipolo	transformar	energia corrente elétrica	radiação eletro-magnética
Campo Elétrico	transformar	energia radiação eletro-magnética	força
Campo Magnético	ampliar	energia voltagem	voltagem
Campo Magnético	reduzir	energia voltagem	voltagem
Campo Magnético	transformar	energia deslocamento	força
Campo Magnético	transformar	energia radiação eletro-magnética	força
Capacitância	acumular	energia voltagem	voltagem
Condução Térmica	transmitir	energia temperatura	temperatura
Condutor Elétrico	ligar	energia corrente elétrica	corrente elétrica

◀ ▶

Ok. Princípios físicos relacionados à função elementar apresentados.

FIGURA 3.44. JANELA DE PESQUISA DE PRINCÍPIOS FÍSICOS

Através deste módulo, pode-se listar, por exemplo, todos os Princípios Físicos cuja Função Elementar seja “transformar energia”, que utilize como causa “energia elétrica” e que gere como conseqüência “força”.

Através do módulo de Cadastro de Componentes (Catálogo), o usuário pode ler as propriedades relacionadas a Componentes já cadastrados, através do botão **Ler**, incluir novos Componentes, através do botão **Incluir**, alterar as propriedades de qualquer Componente já cadastrado, através do botão **Alterar**, e excluir qualquer Componente já cadastrado, através do botão **Excluir**. O retorno à janela principal se dá através do botão **Retornar** (figura 3.45).

Cadastro de Componentes [Catálogo]

Componente:

Características do componente:

beleza, 50
 confiabilidade, 70
 controle, 60
 custo, 5
 distância, 10
 limpeza, 100
 potência, 10
 rendimento, 95
 ruído, 1
 velocidade, 10

Características a in./ex.:

Característica:

Valor: 50

Princípio físico a incluir/excluir:

Princípios físicos do componente:

Lei de Hooke deslocamento/força

Ok. Características do componente apresentadas.

FIGURA 3.45. JANELA DE CADASTRO DE COMPONENTES (CATÁLOGO)

Cada Componente cadastrado deve ter relacionado a ele um Princípio Físico, sendo uma aplicação prática deste, e as características inerentes a si próprio, instanciadas. Como exemplo, o Componente mola é uma aplicação prática do Princípio Físico “Lei de Hooke”, apresentando as características inerentes de beleza igual a 50 (numa faixa possível entre 0 e 100), custo igual a 5 (na mesma faixa possível) e potência igual a 10 (na mesma faixa possível) (figura 3.45). O significado dos valores instanciados para as características de cada Componente é comparado com as características especificadas para um projeto, na fase 4 da Execução.

Afim de facilitar a consulta à base de Componentes cadastrados, desenvolveu-se o módulo de Pesquisa de Componentes (Catálogo). Através deste módulo, o usuário pode levantar todos os Componentes que utilizem um certo Princípio Físico específico, escolhido no quadro *Princípio físico*:. O retorno à janela principal se dá através do botão **Retornar** (figura 3.46).

Pesquisa de Componentes (Catálogo)

Princípio Físico: 

Componente	Princípio Físico	Causa	Consequência
absorvedor	Interferência De	força	força
aquecedor	Lei de Joule	corrente elétrica	temperatura
bolsão de ar	contato	força	força
fio de nylon	ruptura	força	deslocamento
fio quente	ruptura (calor)	temperatura	deslocamento
gerador elétrico	Lei de Faraday d	força	corrente elétrica
gerador elétrico	Segunda Lei de N	força	corrente elétrica
isolante mecânico	isolamento mecânico	pressão	pressão
jateador de ar	ruptura	força	deslocamento
lâmina	ruptura	força	deslocamento
mola	Lei de Hooke das	deslocamento	força

Ok. Componentes relacionados ao princípio físico apresentados.

FIGURA 3.46. JANELA DE PESQUISA DE COMPONENTES (CATÁLOGO)

Através deste módulo, pode-se listar, por exemplo, todos os Componentes que sejam uma aplicação do Princípio Físico "Lei de Joule".

3.4.5. Outros recursos do sistema

a) Localização dos arquivos de dados

O programa permite que sejam arquivados vários conjuntos de dados/conhecimentos para diferentes projetos, desde que estes arquivos estejam localizados em diretórios diferentes. Por exemplo, o usuário pode

criar, através do Windows, um diretório nomeado como "Proj1" para o primeiro projeto, "Proj2" para o segundo projeto e assim por diante. Para acessar um conjunto específico de arquivos de dados/conhecimentos, utiliza-se a janela de Localização dos Arquivos de Dados, acessada através do menu **Arquivo** da janela principal, comando **Localização dos arquivos** (figura 3.47). Neste janela, o usuário indica o *drive*, dentre os disponíveis no seu sistema operacional, e o caminho a percorrer na árvore de diretórios do *drive* especificado. Como informativo, o programa vai apresentando a localização escolhida num quadro localizado na parte superior da janela (figura 3.48).

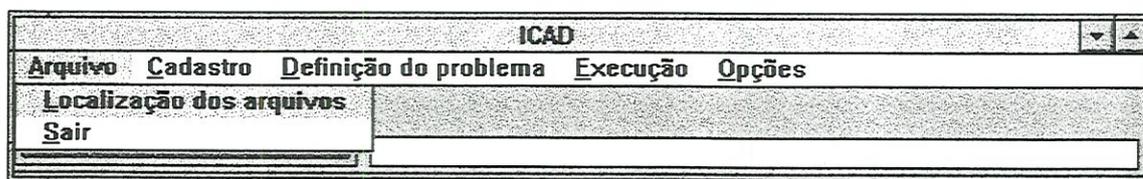


FIGURA 3.47. ACESSO AO MÓDULO DE LOCALIZAÇÃO DOS ARQUIVOS

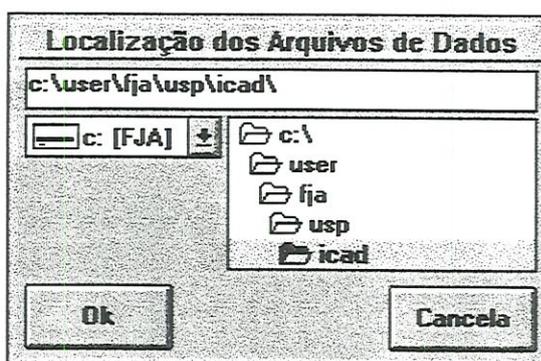


FIGURA 3.48. JANELA DE LOCALIZAÇÃO DOS ARQUIVOS DE DADOS

b) Saída do programa

A saída do programa é feita através do menu **Arquivo** da janela principal, comando **Sair** (figura 3.49). Pode-se sair do programa também através do ícone respectivo na barra de ferramentas (figura 3.50).

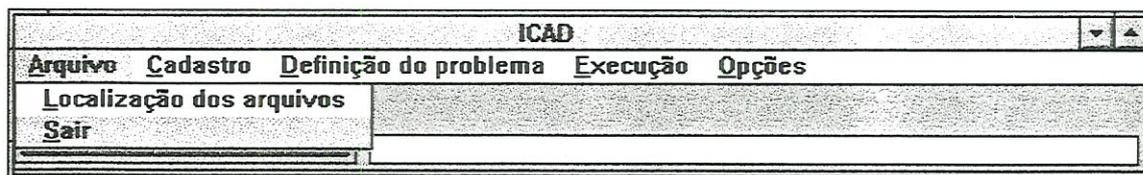


FIGURA 3.49. ACESSO À SAÍDA DO PROGRAMA

c) Barra de ferramentas

É disponibilizada uma barra de ferramentas, que pode ser ativada ou desativada através do menu **Opções** da janela principal. Por *default*, toda vez que se inicia o programa, a barra de ferramentas está ativada (figura 3.50).

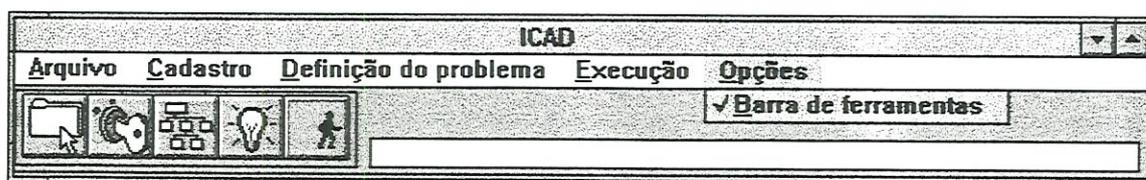


FIGURA 3.50. ATIVAÇÃO/DESATIVAÇÃO DA BARRA DE FERRAMENTAS

Os ícones que compõem a barra de ferramentas e suas respectivas funções são:



Acessa a janela de Localização de Arquivos de Dados.



Acessa a janela de Identificação do Verbo do Projeto (ação), iniciando a fase de Definição do Problema.



Acessa a janela da Fase 1 - Funções Parciais, iniciando a fase de Execução da busca de soluções.



Acessa a janela da Fase 5 - Recombinação dos Componentes, permitindo-se o acesso direto às soluções encontradas pelo programa.



Acessa a saída do programa.

4. Avaliação e Conclusões

4.1. Avaliação da Metodologia de Projeto Conceitual e do Sistema Baseado em Conhecimento

No atual estágio do trabalho, está-se procedendo à avaliação da metodologia proposta e do sistema desenvolvido. Resultados já obtidos demonstram a validade da proposta.

Estes resultados iniciais relacionam-se a duas formas distintas de avaliação, uma da aplicabilidade da Metodologia de Projeto Conceitual proposta e outra da efetividade do Sistema Inteligente de Projeto Auxiliado por Computador desenvolvido.

Estas avaliações estão baseadas na execução do Sistema Inteligente de Projeto Auxiliado por Computador desenvolvido, que é a ferramenta de implementação da Metodologia de Projeto Conceitual proposta. Para tanto, propôs-se um problema real a ser resolvido pelo programa, qual seja o de cortar grama. Seguindo a metodologia proposta, o **Verbo**, ou ação, do projeto identificado foi *cortar*, e o **Objeto** receptor da ação identificado foi *grama*.

Ainda seguindo a metodologia proposta, foram definidas as características para o Objeto grama, ou seus **adjetivos**, de acordo com a figura 4.1. Também foram definidas as características para a ação, ou os **advérbios**, de acordo com a figura 4.2.

Identificação do Objeto do Projeto (receptor da ação)

Objeto:

Caracts. do objeto do projeto (adjetivos):
 armazenagem solta
 custo baixo
 perenidade alta
 peso leve
 quantidade médio

Característica (adjetivo) a incluir/excluir:

Característica (adjetivo):

Instanciação:

Objeto escolhido apresentado. Clique sobre a função desejada.

FIGURA 4.1. CARACTERÍSTICAS PARA O OBJETO DO PROJETO

Caracterização da Ação do Projeto (advérbios)

Característica a incluir/excluir (advérbio):

necessária
 desejável

Verbos (ação):

Característica da ação (advérbio):

Instanciação:

Características necessárias da ação do projeto:
 controle mínimo exigível médio
 custo máximo admissível médio
 distância mínimo exigível longe
 ruído máximo admissível baixo

Características desejáveis da ação do projeto:
 beleza mínimo exigível médio
 confiabilidade mínimo exigível média
 limpeza mínimo exigível limpa
 rendimento mínimo exigível alto

Verifique a ação do projeto (verbos) e clique sobre a função desejada.

FIGURA 4.2. CARACTERÍSTICAS PARA AÇÃO DO PROJETO

Para este projeto assim definido, o programa identificou dezesseis soluções viáveis, com adequabilidades entre sessenta e quatro por cento e cinco por cento. A figura 4.3 apresenta as duas soluções com melhor adequabilidade.

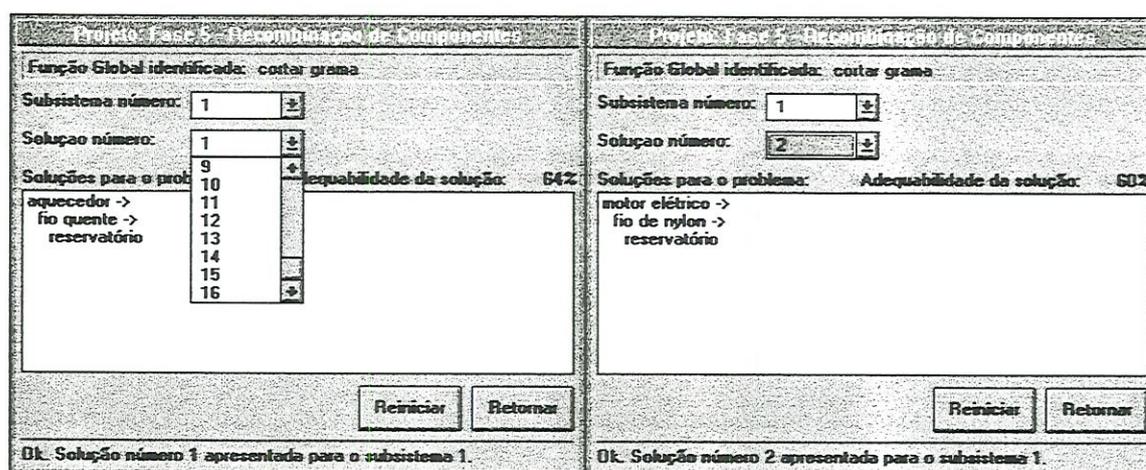


FIGURA 4.3. SOLUÇÕES IDENTIFICADAS PARA O PROJETO

4.1.1. Avaliação da Metodologia de Projeto Conceitual

Quanto à avaliação da Metodologia de Projeto Conceitual proposta, resgatando-se os objetivos apresentados no início deste trabalho, pode-se verificar que a mesma é efetivamente passível de implementação no computador, por uma razão evidente. Desta forma, garante-se a integração com as demais fases do projeto. Esta integração, inclusive, está em processo de implementação, através da integração com o Sistema Baseado em Conhecimento de Avaliação, a cargo de outro trabalho de Doutorado em desenvolvimento.

Um dos principais objetivos da metodologia proposta também recebe avaliação positiva, qual seja a de metodizar, ou sistematizar, o

processo de Projeto Conceitual. Conforme apresentado no item 3.2. da parte B deste trabalho, a metodologia sistematiza o processo de Projeto Conceitual, tornando independentes a qualidade das soluções encontradas e a inspiração do projetista. Esta avaliação pode ser feita pela constatação de o programa ter produzido dezesseis soluções para o projeto, com a identificação de vinte e cinco Princípios Físicos para uma certa Função Elementar componente da seqüência de solução - no caso, a Função Elementar *transformar energia* - (figura 4.4). Da mesma forma, pode-se garantir a redução do trabalho humano com a aplicação da metodologia e o conseqüente aumento da produtividade, uma vez que, como se verifica, a obtenção das soluções é feita naturalmente, com o sistema trabalhando como uma memória auxiliar para o projetista.

Projeto: Fase 3 - Princípios Físicos

Função Global identificada: cortar grama

Funções elementares não atendidas:

Subsistema número:

Função elementar:

Princípios físicos identificados:

Lei de Joule

Lei de Ohm corrente/voltagem

Lei de Ohm voltagem/corrente

Primeira Lei da Termodinâmica corrente/temperatura

Primeira Lei da Termodinâmica deslocamento/temperatura

Primeira Lei da Termodinâmica nuclear/temperatura

Princípio de Arquimedes deslocamento/força

Princípio de Arquimedes força/deslocamento

Segunda Lei de Newton deslocamento/força

Segunda Lei de Newton força/aceleração

Segunda Lei de Newton força/deslocamento

Solenóide

Ok. Princípios físicos para a função elementar apresentados.

FIGURA 4.4. PRINCÍPIOS FÍSICOS IDENTIFICADOS

A metodologia agiliza o processo de projeto, pois disponibiliza muito mais rapidamente as informações necessárias, tais como Componentes e Princípios Físicos aplicáveis a um certo problema, e efetua as combinações na busca de soluções muito mais rapidamente.

Avaliando-se as soluções identificadas pelo programa, pode-se verificar através do programa desenvolvido que a metodologia proposta facilita o uso de soluções anteriormente conhecidas para um dado problema. Como a metodologia divide o problema geral, ou Função Global, em subfunções, ou Funções Parciais e estas em Funções Elementares, o usuário da metodologia pode lançar mão de soluções já conhecidas para “partes” do problema original, quando as tiver, conforme explicitado à página 75, na seção 3.3.3 deste trabalho.

Considerando-se que o programa forneceu dezesseis soluções para um problema razoavelmente simples, pode-se concluir que a Metodologia de Projeto Conceitual proposta estimula a criatividade do projetista. Este, visualizando as soluções, e contando com a recombinação dos Componentes, pode vir a imaginar, ou criar, novas soluções, estimulado pela resposta obtida através da aplicação da metodologia.

A se realçar o fato de a metodologia permitir se tratar o problema em termos naturais às pessoas, pois, conforme visto, este problema é definido através de uma “frase” composta de um **verbo** (a ação desejada), um **objeto direto** (o receptor da ação), alguns adjuntos adverbiais, ou **adjetivos** (que caracterizam o objeto direto) e alguns adjuntos verbais, ou **advérbios** (que caracterizam o verbo). Esta frase é montada parte por parte enquanto o usuário navega pelos módulos de identificação do problema, conforme a letra a da seção 3.4.3.

4.1.2. Avaliação do Sistema Inteligente de Projeto Auxiliado por Computador

No que diz respeito à avaliação do Sistema Inteligente de Projeto Auxiliado por Computador desenvolvido, também resgatando-se os requisitos propostos para este tipo de sistema computacional, pode-se verificar a avaliação positiva que o mesmo recebe.

Como o programa permite a manipulação da localização dos arquivos de dados/conhecimentos, ele permite a manipulação de vários projetos concomitantemente. Apesar da relativa rapidez com que o programa chega às soluções para um dado problema, o usuário pode, caso deseje, “pular” para outro problema, bastando apenas alterar-se o diretório de trabalho, através da janela de Localização de Arquivos, conforme apresentada na parte B deste trabalho, item 3.4.5.

Através da opção Esquema da janela da Fase 1 - Funções Parciais e da opção Imagem, da janela da Fase 2 - Funções Elementares, o usuário pode visualizar e manipular, no primeiro caso, esquemas gráficos correspondentes às soluções identificadas pelo ou com auxílio do programa (figura 4.5.). No segundo caso, o usuário pode visualizar a seqüência de Funções Elementares para cada subsistema identificado na solução. Como já citado anteriormente, a simbologia utilizada é aquela proposta por ROTH (1982), apresentada em FIOD (1993).

Também pode-se verificar que o programa utiliza cores para incrementar o entendimento do esquema gráfico: para funções que tratem com a grandeza energia, é utilizada a cor vermelha; para funções que tratem com a grandeza matéria, é utilizada a cor verde e, finalmente, para funções que tratem com a grandeza sinal, é utilizada a cor azul. Esta característica de manipulação de esquemas gráficos é um dos requisitos desejáveis para Sistemas Inteligentes de Projeto Auxiliado por Computador.

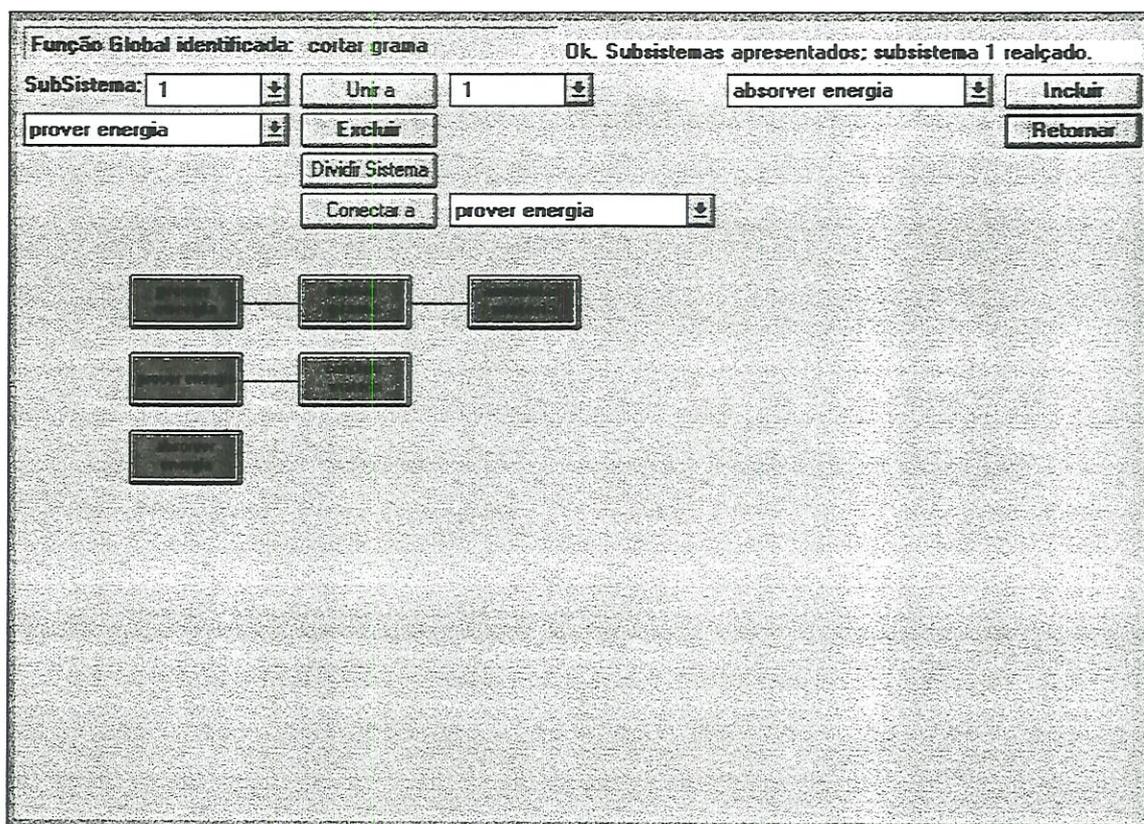


FIGURA 4.5. MANIPULAÇÃO DO ESQUEMA GRÁFICO DA SOLUÇÃO GERAL

Conforme pode ser visualizado através das figuras 4.1 e 4.2, o sistema computacional consegue tratar e manter as restrições do projeto. Estas restrições são utilizadas para a filtragem e avaliação inicial das soluções identificadas. Este é outro requisito para Sistemas Inteligentes de Projeto Auxiliado por Computador.

Quanto aos requisitos de capacidade de sugerir soluções para problemas submetidos e de trabalhar como uma extensão da memória do projetista, o sistema desenvolvido também recebe avaliação positiva. As soluções são propostas pelo programa automaticamente (figura 4.3.), com base nas regras de projeto e nos dados de Princípios Físicos e Componentes inseridos na sua base de conhecimento (figuras 4.6 e 4.7).

Cadastro de Princípios Físicos

Princípio Físico: ↓

Função elementar: ↓ ↓

Causa: ↓

Consequência: ↓

Descrição:

Ok. Caracterização do princípio físico apresentada.

FIGURA 4.6. CONHECIMENTO RELATIVO A PRINCÍPIOS FÍSICOS

Cadastro de Componentes [Catálogo]

Componente: ↓

Características do componente:

beleza, 80
confiabilidade, 90
controle, 40
custo, 30
distância, 20
limpeza, 95
potência, 80
rendimento, 60
ruído, 70

Características a in./ex.:

↓

Característica: ↓

Valor: 80

← →

Princípio físico a incluir/excluir:

↓

Princípios físicos do componente:

Segunda Lei de Newton força/deslocamento
Lei de Faraday deslocamento/corrente

Ok. Características do componente apresentadas.

FIGURA 4.7. CONHECIMENTO RELATIVO A COMPONENTES

Da mesma forma, o programa avalia, de maneira inicial, as soluções por ele identificadas. Esta avaliação das soluções é feita apenas com base na adequabilidade que cada solução apresenta em relação a atender ou não as características para a ação do projeto, ou requisitos do problema. Avaliações mais aprofundadas para as soluções identificadas são necessária, sendo que estas fazem parte de uma fase do projeto mecânico posterior à de Projeto Conceitual, conforme os itens 2.2. e 2.4., da parte A deste trabalho.

Finalmente, pode-se verificar que o programa também atende ao último para Sistemas Inteligentes de Projeto Auxiliado por Computador, qual seja o de prover justificativas para suas proposições. Conforme pode ser verificado, na execução das fases 2, 3 e 4, o programa sempre apresenta, ao lado da sua proposição, a origem do raciocínio (figura 4.8).

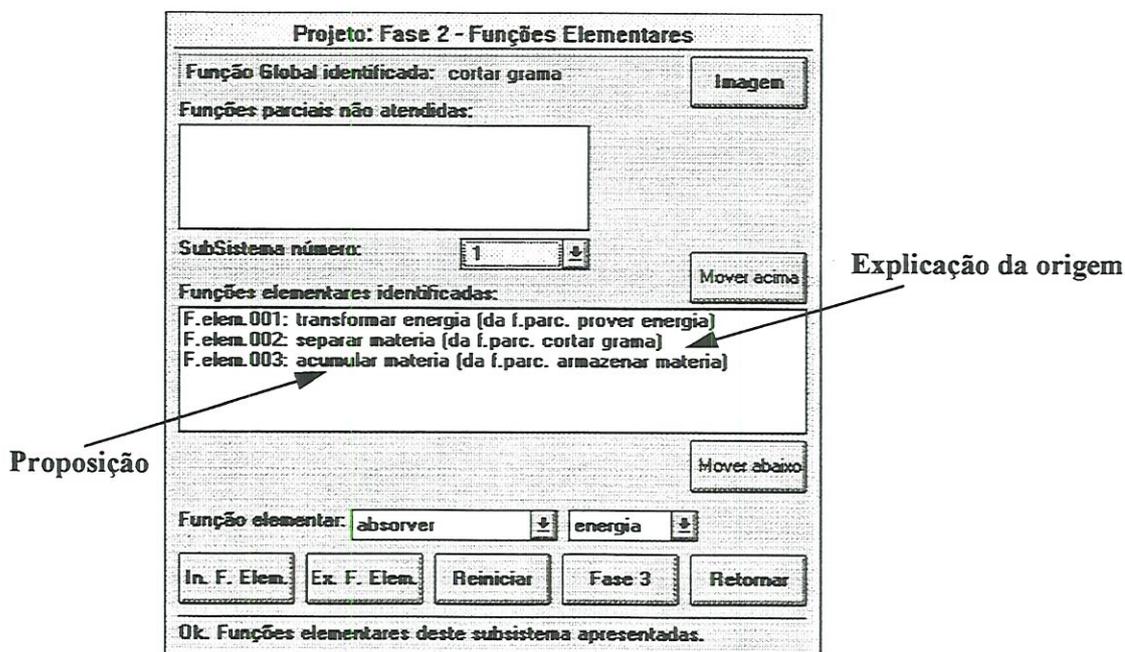


FIGURA 4.8. JUSTIFICATIVAS PARA AS PROPOSIÇÕES DO PROGRAMA

Além destas considerações, pode-se afirmar que o programa também atende às especificações de apresentar um interface amigável (comprovado nas figura relativas ao sistema desenvolvido) e de apresentar portabilidade. Sendo esta entendida de acordo com sua definição mais atual, o sistema desenvolvido pode ser executado em várias configurações de microcomputadores, desde um 386 com monitor monocromático, até um Pentium com monitor colorido. Tendo sido desenvolvido para ambiente Windows 3.1/3.11, logicamente o programa exige a presença desta plataforma de *software*. Da mesma forma, tendo sido desenvolvido para processador Intel 386/486/Pentium, ele exige a presença de um destes processadores, ou de outro processador que simule um dos citados.

Devido à limitação atual da base de conhecimentos (Componentes e Princípios Físicos), o sistema não pôde ser aplicado a muitos tipos de problemas. Para os problemas em que ele foi aplicado, porém, seu desempenho foi bastante satisfatório. Como já verificado, foram encontrados vinte e cinco Princípios Físicos para uma certa Função Elementar e dezesseis soluções para um subsistema proposto como problema. Isto, sem dúvida, comprova a funcionalidade do Sistema Inteligente de Projeto Auxiliado por Computador e garante que se atingiu o objetivo de estimular a criatividade do projetista.

4.1.3. Considerações finais

Algumas considerações adicionais podem ser feitas, tais como:

- a) Verificou-se na prática que o uso de esquemas gráficos é muito mais interessante para o desenvolvimento do trabalho do projetista ao interagir com o programa, sendo o sistema oferece este tipo de recurso;
- b) O sistema desenvolvido é dependente da qualidade da base de conhecimentos que ele apresenta; a previsão acerca desta característica já havia sido levantada durante os itens 2.3 da parte A e 3.3.3. da parte B deste

trabalho, uma vez que o programa desenvolvido é um Sistema Baseado em Conhecimento.

A se realçar ainda o fato de que o usuário deve cercar-se de todos os cuidados ao alterar a base de conhecimentos - Princípios Físicos, Componentes, Funções Parciais, Regras de Projeto - pois ele pode gerar inconsistências na mesma. Por exemplo, pode-se cadastrar duas características de ação que possam gerar a mesma Função Parcial ou, ainda, pode-se excluir um Componente que seria necessário para compor uma solução de um problema submetido.

Uma característica muito interessante do programa desenvolvido é que o sistema "cresce" com o uso continuado: o cadastro de novos itens faz aumentar a base de conhecimento e crescer o sistema, possibilitando que o mesmo identifique novas soluções para problemas, a cada vez que ele é executado. Este fato é consequência direta da característica que o programa apresenta de manter sua base de conhecimento aberta, ou gerenciável, para o usuário e é característico de sistemas baseados em conhecimento.

4.2. Conclusões

Neste trabalho objetivou-se formalizar uma Metodologia de Projeto Conceitual objetivando a aplicação em um Sistema Inteligente de Projeto Auxiliado por Computador. Para tanto, verificou-se a necessidade de se sistematizar o processo de Projeto Conceitual, possibilitando a transferência do mesmo para o computador. Na eleição do método a ser utilizado, optou-se por uma variação do Método de Projeto Sistemático, devido às suas características intrínsecas. Apresentadas as fases do projeto, com detalhamento dos passos do Projeto Conceitual e das suas características, concluiu-se da necessidade de que os sistemas computacionais apresentem inteligência, lançando-se então mão da Inteligência Artificial. Este fato gerou uma nova dificuldade, a necessidade de se trabalhar com sistemas

computacionais contendo bases de dados e bases de conhecimentos. Como solução, propôs-se a estruturação destas informações através da representação por Frames e Regras de Produção, obtendo êxito. A aplicabilidade da Metodologia de Projeto Conceitual proposta foi demonstrada na forma de um programa computacional, que foi desenvolvido e apresentado, demonstrando a validade das considerações feitas anteriormente. Este programa aplica todos os conceitos discutidos, com bons resultados.

Proposições para a continuidade deste trabalho que podem ser apresentadas são:

- aumento da base de conhecimentos, principalmente no que diz respeito a Princípios Físicos e a Componentes, uma vez que o programa, como todo Sistema Baseado em Conhecimento, é totalmente dependente da qualidade desta;
- implementação do programa em outra linguagem com maiores recursos de raciocínio lógico, por exemplo C++ ou, ainda, utilizando uma versão da linguagem Prolog que seja compilável e que apresente maiores possibilidades de se gerar uma melhor interface gráfica; outra opção seria a implementação deste programa utilizando uma *shell*, do tipo da CLIPS, agora em nova versão;
- implementação de visualização gráfica dos Princípios Físicos, para mais fácil entendimento da idéia que os mesmos exprimem pelo usuário;
- incremento das regras de projeto cadastradas no sistema, a obtenção deste conhecimento depende de ter-se ou não disponibilidade de um especialista, e
- implementar a completa integração com o Sistema Baseado em Conhecimento de Avaliação.

BIBLIOGRAFIA CITADA

151 citações

- 3th INTERNATIONAL CONFERENCE ON DESIGN THEORY AND METHODOLOGY** (Proceedings). New York, USA, ASME, 1992.
- AKMAN, V.; ten HAGEN, P.J.W.; VEERKAMP, P.J. (eds). **Intelligent CAD Systems II**. Berlim, Germany, Springer-Verlag, 1989.
- AKMAN, V.; ten HAGEN, P.J.W.; TOMIYAMA, T. A Fundamental and Theoretical Framework for an Intelligent CAD System. **Computer Aided Design** v 22 n 6 1990. p 352-367.
- ANDERSSON, K. Vocabulary for conceptual design. **IFIP Transactions B: Computer Applications in Technology** B18, 1994. p 157-171.
- ANDERSSON, Kjell; MAKKONEN, Petri; PERSSON, Jan-Gunnar. Proposal to a product modelling language to support conceptual design. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v 44 n 1, 1995. p 129-132.
- ASIMOW, Morris. **Introduction to Design**. Englewood Cliffs, USA, Prentice-Hall Inc., 1962.
- ASIMOW, Morris. **Introdução ao Projeto**. Tradução de José Wanderley Coêlho Dias. São Paulo, Brasil, Editora Mestre Jou, 1968.
- ASME DESIGN AUTOMATION CONFERENCE** (Proceedings). Miami, USA, ASME, 1991.
- BAR-COHEN, Avram. Mechanical engineering in the information age. **Mechanical Engineering** v 117 n 12 Dec 1995. p 66-70.
- BARDSZ, Theodore; ZEID, Ibrahim. Blackboard architecture to support case-based reasoning in mechanical design. **Advances in Design Automation 1992 American Society of Mechanical Engineers, Design Engineering Division - DE** v 44 pt 1. New York, USA, ASME, 1992. p 337-343.
- BARR, Avron; FEIGENBAUM, Edward A. **The Handbook of Artificial Intelligence - Volume 1**. Reading, USA, Addison-Wesley Publishing Company, 1981.
- BEITZ, W. Management system for continuous and flexible CAD. **Konstruktion** 39 1987, H. 7, S. 251-154.
- BERNUS, P.; LETRAY, Z. Intelligent Systems Interconnections: what should come after open systems interconnection? **Intelligent CAD Systems I**. P.J.W. ten Hagen & T. Tomiyama (eds.). Berlim, Germany, Springer-Verlag, 1987. p 44-56.
- BIELAWSKI, Larry; LEWAND, Robert. **Intelligent Systems Design**. New York, USA, John Wiley & Sons, 1991.
- BRACEWELL, R.H.; SHARPE, J.E.E. Functional descriptions used in computer support for qualitative scheme generation - "Schemebuilder". **Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM**, v 10 n 4 Sep 1996. p 333-345.
- BREEDVELD, Peter C. Computer-aids for modelling and conceptual design. Proceedings of the **IEEE International Conference on Systems, Man**

- and Cybernetics** v 2 (Proceedings). Piscataway, USA, IEEE, 1993. p 209-215.
- CANDY, Linda; EDMONDS, Ernest. Creative design of the Lotus bicycle: implications for knowledge support systems research. **Design Studies** v 17 n 1 Jan 1996. p 71-90
- CHANDRASEKARAN, B. Design problem solving: a task analysis. **AI Magazine**, v 11 n 4 1990. p 59-71.
- CHAKRABARTI, Amaresh; BLIGH, Thomas P. Approach to functional synthesis of mechanical design concepts: theory, applications, and emerging research issues. **Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM**, v 10 n 4 Sep 1996. p 313-331.
- CHEN, Jahau Lewis; YAN, Hong-Sen; SHINE, Ge-Yan. Expert System for Machine Screws Selection in Engineering Design. **Expert Systems with Applications**, v 4 n 1, 1992. p 141-146.
- CLIBBON, Kelvin; EDMONDS, Ernest. Representing strategic design knowledge. **Engineering Applications of Artificial Intelligence** v 9 n 4 Aug 1996. p 349-357.
- COLTON, Jonathan S; OUELLETTE, Mark P. Form verification from the conceptual design of complex mechanical systems. **Advances in Design Automation American Society of Mechanical Engineers, Design Engineering Division** v65 pt1. New York, USA, ASME, New York, 1993. p 97-108.
- COLTON, Jonathan S.; OUELLETTE, Mark P. Form verification system for conceptual design of complex mechanical systems. **Engineering with Computers** v 10 n 1 1994. p 33-44.
- COLTON, Jonathan S.; PUN, Raymond C. Information frameworks for conceptual engineering design. **Engineering with Computers** v 10 n 1 1994. p 22-32
- CROSS, Nigel. **Engineering Design Methods**. Chichester, UK, John Wiley & Sons, 1996.
- CSILLAG, J., M. **Análise de Valor - Metodologia de valor**. São Paulo, Brasil, Atlas, 1985.
- DAVID, B.T. Multi-Expert Systems for CAD. **Intelligent CAD Systems I**. P.J.W. ten Hagen & T. Tomiyama (eds.). Berlim, Germany, Springer-Verlag, 1987. p 57-67.
- DIXON, John R. **Design Engineering**. New York, USA, McGraw-Hill, 1966.
- DIXON, John R.; CUNNINGHAM, John J. Research in Designing with Features. **Intelligent CAD, I**. H. Yoshikawa & D. Gossard (eds.). Amsterdam, The Neederlands, North-Holland, 1989. p 137-148.
- DOBROVOLSKY, V.A. **Machine Elements**. Moscow, USSR, Peace Publishers, 1966.
- DUFFY, A.H.B.; PERSIDIS, A.; MacCALLUM, K.J. NODES: a numerical and object based modelling system for conceptual engineering design. **Knowledge-Based Systems** v 9 n 3 May 1996. p 183-206.

- DURKIN, John. **Expert Systems - design and development**. New York, USA, Macmillan Publishing Company, 1994.
- ERMER, G.; GOODMAN, E.; HAWKINS, R.; McDOWELL, J.; ROSENBERG, R.; STICKLEN, J. Steps toward integrating function-based models and bond-graphs for conceptual design in engineering. **Automated Modeling for Design American Society of Mechanical Engineers, Dynamic Systems and Control Division, DSC v 47**. New York, USA, ASME, 1993.
- ERTAS, Atila; JONES, Jesse C. **The Engineering Design Process**. New York, USA, John Wiley & Sons, Inc., 1993.
- EVBUOMWAN, Nosa F.O.; SIVALOGANATHAN, Sangarappillai. Generation of conceptual designs within Design Function Deployment. **Methodologies, Techniques and Tools for Design Development American Society of Mechanical Engineers, Petroleum Division - PD v 64 n 5**. New York, USA, ASME, 1994. p 61-66.
- FAIRES, Virgil M. **Elementos Orgânicos de Máquinas**. Tradução de Humberto Cesar Tavares Gonçalves. Rio de Janeiro, Brasil, Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 1982.
- FENG, Xinan; ZHANG, Ying-zhong. Intelligent CAD for Box-type Machine Components. **CIRP Annals**, v 14 n 1 1992. p 217-220.
- FERNANDES, Francisco. **Dicionário de Sinônimos e Antônimos**. Porto Alegre, Brasil, Editora Globo, 1982.
- FERNANDES, Francisco. **Dicionário de Verbos e Regimes**. Rio de Janeiro, Brasil, Editora Globo, 1982.
- FERREIRA, Aurélio Buarque de Holanda. **Novo Dicionário da Língua Portuguesa**. Rio de Janeiro, Brasil, Editora Nova Fronteira, 15a edição.
- FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE. APPLICATIONS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN ENGINEERING (Proceedings)**. Boston, USA, Computational Mechanics Publications and Springer-Verlag, 1990.
- FIOD Neto, Miguel. **Desenvolvimento de Sistema Computacional para Auxiliar a Concepção de Produtos Industriais (Tese - Doutorado)**. Florianópolis, Brasil, Universidade Federal de Santa Catarina, 1993.
- FIOD Neto, Miguel; BACK, Nelson. Análise Crítica de Métodos de Projeto, Visando ao Desenvolvimento de um Sistema CAD para Concepção de Produtos. **Revista Brasileira de Ciências Mecânicas v 17 n 4 1995**. p 387-393.
- FIOD Neto, Miguel; BACK, Nelson. Assessment of product conception: a critical review. **Revista Brasileira de Ciências Mecânicas v 17 n 1 1995**. p 109-115.
- FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN DESIGN (Proceedings)**. Edinburg, Scotland, 1991.
- FRENCH, M.J. **Conceptual Design for Engineers**. Berlin, Germany, Springer-Verlag, 1985.

- GINSBERG, Matt. **Essentials of Artificial Intelligence**. San Mateo, USA, Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1993.
- GERO, J.S. (ed). **Artificial Intelligence in Engineering Design**. Amsterdam, The Neederlands, Elsevier Science Publishers, 1988.
- GERO, J.S. Design Prototypes: a knowledge representation schema for design. **AI Magazine** v 11 n 4 1990. p 26-36.
- GINSBERG, Matthew L. **Essentials of Artificial Inteligence**. San Mateo, USA, Morgan Kaufman Publishers, 1993.
- GORTI, S.R.; SRIRAM, R.D. From symbol to form: a framework for conceptual design. **Computer Aided Design** v 28 n 11 Nov 1996. p 853-870.
- GRIGELY, Lawrence J.; BILLATOS, Samir B. Case based reasoning approach to concurrent engineering. **Intelligent Concurrent Design: Fundamentals, Methodology, Modelling, and Practice American Society of Mechanical Engineers, Design Engineering Division - DE** v 66. New York, USA, ASME, 1993. p 83-95
- GROSS, Mark D. Electronic cocktail napkin - a computational environment for working with design diagrams. **Design Studies** v 17 n 1 Jan 1996. p 53-69
- GROOVER, Mikell P.; ZIMMERS, Jr., Emory W. **CAD/CAM: computer-aided design and manufacturing**. Englewood Cliffs, USA, Prentice-Hall Inc, 1984.
- HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; KRANE, Kenneth S. **Física**. Tradução de Gabriel Armando Pelegatti Franco, Luiz Paulo Ribeiro Vaz, Marcio Quintão Moreno, Maria Letícia Maciel Myrrha, Olísia de Oliveira Damasceno, Ramayana Gazzinelli e Suely Epsztein Grynberg. Rio de Janeiro, Brasil, Livros Técnicos e Científicos Editora SA, 1992.
- HOGGER, Christopher John. **Essentials of Logic Programming**. Oxford, UK, Clarendon Press, 1990.
- HOOVER, S. P.; RINDERLE, J. R.; FINGER, S. Models and abstractions in design. **International Conference on Engineering Design - ICED'91 (Proceedings)**. Zurich, 1991. p 46-57.
- HUANG, C.P.; LIOU, F.W.; MALYAMAKKIL, J.J.; LU, W.F. Advisory conceptual design tools for mechanical transmission systems. **23rd Biennial Mechanisms Conference American Society of Mechanical Engineers, Design Engineering Division**. New York, USA, ASME, v71, n pt2, 1994. p 391-399.
- HUMPHREY, Watts S. **A Discipline for Software Engineering**. Reading, USA, Addison-Wesley Publishing Company, 1995.
- HUNDAL, M.S. A Systematic Method for Developing Function Structures, solutions and concept variants. **Mechanism and Machine Theory** v 25 n 3, 1990. p 243-256.
- HUNDAL, M.S. A methodical procedure for search of solutions from function structures. **International Conference of Engineering Design - ICED'91 (Proceedings)**. Zurich, 1991. p 9-16.
- HUNDAL, M.S.; LANGHOLTZ, L.D. Computer-aided conceptual design: an application of X windows, with C. **3th International Conference on**

Design Theory and Methodology (Proceedings). New York, USA, ASME, 1992. p 1-9.

IIDA, Itiro. **Ergonomia - projeto e produção**. São Paulo, Brasil, Editora Edgard Blucher Ltda, 1990.

INTERNATIONAL COMPUTERS IN ENGINEERING CONFERENCE (Proceedings). New York, USA, ASME, 1991.

ISHII, Masaki; TOMYIAMA, Tetsuo; YOSHIKAWA, Hiroyuki. Synthetic Reasoning Method for Conceptual Design. **IFIP Transactions B: Computer Applications in Technology**, n B-17, 1994. p 3-16.

JENKINS, D.L.; MARTIN, R.R. Importance of free-hand sketching in conceptual design: automatic sketch input. **Design Theory and Methodology American Society of Mechanical Engineers, Design Engineering Divison-DE** v 53. New York, USA, ASME, 1993. p 115-128

JONES, Capers. **Produtividade no Desenvolvimento de Software**. Trad. José C. B. dos Santos. São Paulo, Brasil, Makron Books do Brasil Editora Ltda / McGraw-Hill, Ltda, 1991.

JUNG, Joo Y.; BILLATOS, Samir B. Expert System for Assembly Based on Axiomatic Design Principles. **Journal of Intelligence and Robotics Systems** v 8 n 2 Oct 1993. p 245-265.

KAWAKAMI, H.; KATAI, O.; SAWAARAGI, T.; KONISHI, T.; IWAI, S. Knowledge acquisition method for conceptual design based value on value engineering and axiomatic theory. **Artificial Intelligence in Engineering**, v 10 n3 Aug 1996. p 187-202.

KIMURA, Fumihiko. Architecture of Intelligent CAD Systems. **Intelligent CAD**, I. H. Yoshikawa & D. Gossard (eds.). Amsterdam, The Neederlands, North-Holland, 1989. p 29-32.

KLEIN, S. An example of knowledge-based decision making when selecting standard components: shaft-hub connections. **3th International Conference on Design Theory and Methodology** (Proceedings). New York, USA, ASME, 1992. p 149-156.

KRAUSE, Frank-Lothar. Configuração de produtos com sistemas especialistas. **Revista Máquinas e Metais**, Ano XXVI, n. 307, agosto 1991. p 50-65.

KUMARA, Soundar R. T.; KAMARTHI, Sagar V. Application of adaptive resonance networks for conceptual design. **CIRP Annals** v 41 n 1 1992. p 213-216.

KUSIAK, A.; SZCZERBICKI, E. Formal approach to specifications in conceptual design. **Journal of Mechanical Design Transactions of the ASME** v 144 n 4 Dec 1992. p 659-666.

LIPSON, H.; SHPITALNI, M. New interface for conceptual design based on object reconstruction from a single freehand sketch. **CIRP Annals - Manufacturing Technology** v 44 n 1 1995. p 133-136.

- LUCAS, Peter; GAAG, Linda Van Der. **Principles of Expert Systems**. Wokingham, UK, Addison-Wesley Publishing Company, 1991.
- LUGER, George F. & STUBBLEFIELD, William A. **Artificial Intelligence and the Design of Expert Systems**. Redwood Cliffs, USA, The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc., 1989.
- MACRO, Allen. **Software Engineering: concepts and management**. UK, Prentice-Hall International, 1990.
- MARKS II, Robert J. (ed). Fuzzy Logic: technology and applications. **IEEE Technical Activities Board**. New York, USA, IEEE, 1994.
- MARTINS, F.P.; TEIXEIRA Jr., A.; MEGALI, A.; SAKAMOTO, F.H.; RODRIGUES N., V; CAMARGO, I.G.P. Inteligência artificial aplicada à integração CAD-CAM. **X COBEM (Anais)**. Rio de Janeiro, Brasil Associação Brasileira de Ciências Mecânicas/Projeto de Engenharia Mecânica-COPPE, 1989. p 523-526.
- MAYRHAUSER, Anneliese Von. **Software Engineering: methods and management**. Boston, USA Academic Press Inc., 1990.
- McFALLISTER, J. **Artificial Intelligence and Prolog on Microcomputers**. London, UK, Edward Arnold Publishers, 1987.
- MOCKLER, Robert J.; DOLOGITE, D.G. **An Introduction to Expert Systems - knowledge-based systems**. New York, USA, Macmillan Publishing Company, 1992.
- MONARD, Maria Carolina; NICOLETTI, Maria do Carmo. **Programas Prolog para Processamento de Listas e Aplicações (Notas do ICMSC)**. São Carlos, Instituto de Ciências Matemáticas de São Carlos, 1993.
- MUKHERJEE, A.; LIU, C.R. Representation of function-form relationship for the conceptual design of stamped metal parts. **Research in Engineering Design** v 7 n 4 1995. p 253-269.
- NADIN, M.; NOVAK, M. MIND: a design machine - conceptual framework. **Intelligent CAD Systems I**. P. J. W. ten Hagen & T. Tomiyama (Eds). Berlin, Germany, Springer-Verlag, 1987.
- NIEMANN, Gustav. **Elementos de Máquinas**. Tradução de Carlos van Langedonck e Otto Alfredo Rehder. São Paulo, Brasil, Editora Edgard Blucher, 1995.
- NG, Peter A.; YEH, Raymond T. (eds). **Software Engineering**. New York, USA, Van Nostrand Reinhold, 1990.
- NG, Peter A. **Modern Software Engineering**. New York, USA, Van Nostrand Reinhold, 1993
- O'SHAUGHNESSY, Kathleen; STURGES, Jr., Robert H. A systematic approach to conceptual engineering design. **3th International Conference on Design Theory and Methodology (Proceedings)**. New York, USA, ASME, 1992. p.283-291.
- OHMACHI, Tatsuya; INOUE, Katsumi; KATO, Masana. Flexible Generation of Design Process for Mechanical Design of Power Transmission Gear

- Units. **Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers**, Part C v 59 n 563, Jul 1993. p 21-26.
- OXMAN, Rivka. Precedents in design: a computacional model for the organization of case knowledge. **Computing in Civil Engineering** n 1. New York, USA, ASCE, 1994. p 438-445.
- PAHL, G.; BEITZ, W. **Engineering Design - a systematic approach**. Translated by Arnold Pomerans and Ken Wallace. London, UK, The Design Council, 1992.
- PAPALAMBROS, P.; WILDE, D. **Principles of Optimal Design**. New York, USA, Cambridge University Press, 1988.
- PARTRIDGE, Derek. **A New Guide to Artificial Intelligence**. Norwood, USA, Ablex Publishing Corporation, 1991.
- PEIEN, Feng; GUORONG, Xu; MINGJUN, Zhang. Feature modeling based on design catalogues for principle conceptual design. **Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM** v 10 n 4 Sep 1996. p 347-354.
- PITTS, G. **Techniques in Engineering Design**. London, UK, McGrawHill Book Company, 1973.
- PRESSMAN, Roger S. **Engenharia de Software**. Tradução de José Carlos Barbosa dos Santos. São Paulo, Brasil, Makron Books, 1995
- PRESSMAN, Roger S. **Software Engineering: a practioner's approach**. London, UK, McGraw-Hill Book Company, 1992.
- PUGH, Stuart. **Total Design: integrated methods for sucessful product engineering**. Wokingham, UK, Addison Wesley, 1995.
- PUTTRE, Michael. Gearing up for conceptual design. **Mechanical Engineering** v 155 n 3 Mar 1993. p 46-50.
- RICH, Elaine. **Artificial Intelligence**. Singapore, McGraw-Hill Book Company, 1983.
- RODRIGUES, S.R.; MONARD, M.C. **Desenvolvimento de um SBC para Configuração de Tornos Mecânicos (Notas do ICMSC)**. São Carlos, Brasil, Instituto de Ciências Matemáticas de São Carlos, 1995.
- ROY, Utpal. Intelligent interface between symbolic and numeric analysis tools required for the development of an integrated CAD system. **Computers & Industrial Engineering** v 30 n 1 Jan 1996. p 13-26.
- ROY, Utpal; BHARADWAJ, Balaji; SARATHY, Sriprakash; GRAHAM, Patrick. Development of an intelligent product design system: integration strategies. **Applied Artificial Intelligence** v9 n 6 Nov-Dec 1995. p 563-585.
- RUSSELL, Stuart J.; NORVIG, Peter. **Artificial Intelligence: a modern approach**. Englewwod Cliffs, USA, Prentice-Hall, 1995.
- SAWAKI, J.; MONARD, M.C.; RODRIGUES, S.R. **SABNAG: um sistema baseado em conhecimento para suporte aos usuários da biblioteca NAG (Notas do ICMSC)**. São Carlos, Brasil, Instituto de Ciências Matemáticas de São Carlos, 1994.

- SCHMIDT, Gerhard. IBDE, VIKI, ARCHPLAN: architectures for design knowledge representation, acquisition and application. **Intelligent CAD, II**. H. Yoshikawa e T. Holden (eds). Amsterdam, The Neederlands, North-Holland 1990. p 289-308.
- SCHMIDT, Linda C.; CAGAN, Jonathan. Recursive annealing: a computacional model for machine design. **Design Theory and Methodology American Society of Mechanical Engineers, Design Engineering Division-DE**. New York, USA, ASME, 1993. p 243-251.
- SCHMIDT, Linda C.; CAGAN, Jonathan. Recursive annealing: a computacional model for machine design. **Research in Engineering Design** v 7 n 2 1995. p 102-125.
- SEARS, Francis Weston; ZEMANSKY, Mark W. **Física**. Tradução de José de Lima Accioli. Rio de Janeiro, Brasil, Livros Técnicos e Científicos Editora SA, 1978.
- SEARS, Francis Weston; ZEMANSKY, Mark W.; YOUNG, Hugh D. **Física**. Tradução de Jean Pierre von der Weid. Rio de Janeiro, Brasil, Livros Técnicos e Científicos Editora SA, 1990.
- SHAHROUDI, Kamran Eftekhari. Modern approach to conceptual/preliminary design of gas turbine based propulsion systems. **American Society of Mechanical Engineers (Paper)**. New York, USA, ASME, 1994. p 1-13 94-GT-458.
- SHIGLEY, Joseph E. **Elementos de Máquinas**. Tradução de Edival Ponciano de Carvalho. Rio de Janeiro, Brasil, Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, RJ, 1984.
- SHIRAI, Y; TSUJII, J. **Artificial Intelligence - concepts, techniques and applications**. Chichester, UK, John Wiley & Sons, 1982.
- SILVA, João B. A; BACK, Nelson; LEAL, Longuinho C. M. SIPE - um sistema CAE para o projeto de eixo-árvore de máquinas ferramentas. **X COBEM (Anais)**. Rio de Janeiro, Brasil, Associação Brasileira de Ciências Mecânicas/Projeto de Engenharia Mecânica-COPPE, 1989. p 351-354.
- SMITH, Peter. **Expert System Development in Prolog and Turbo-Prolog**. Chichester, UK, John Wiley & Sons, 1988.
- SMITHERS, Tim; Conkie, Alistair; Doheny, Jim; Logan, Brian; Millington, Karl. Design as Intelligent Behavior: an AI in design research programme. **Artificial Intelligence in Design**. J.S. Gero (ed.). Berlim, Germany, Springer-Verlag, 1989. p 293-334.
- SOMMERVILLE, Ian. **Software Engineering**. Wokingham, UK, Addison-Wesley Publishing Company, 1990.
- SUH, Nam P. **The Principles of Design**. New York, USA, Oxford University Press, 1990.
- STERLING, Leon; SHAPIRO, Ehnd. **The Art of Prolog**. Massasuchetts, USA, The MIT Press, 1986.
- STURGES, Robert; O'SHAUGHNESSY, Kathleen; KILANI, Mohammed I. Computacional model for conceptual design based on extended function logic. **Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM**, v 10 n 4 Sep 1996. p 255-274.

- SZYKMAN, Simon; CAGAN, Jonathan. A computational framework to support design abstraction. **3th International Conference on Design Theory and Methodology** (Proceedings). New York, USA, ASME, 1992. p.27-39.
- TAKEDA, Hideaki; TOMIYAMA, Tetsuo; YOSHIKAWA, Hiroyuki. A logical and computable framework for reasoning in design. **3th International Conference on Design Theory and Methodology** (Proceedings). New York, USA, ASME, 1992. p.167-174.
- TANIMOTO, Steven L. **The Elements of Artificial Intelligence**. Rockville, USA, Computer Science Press, Inc., 1987.
- ten HAGEN, P.J.W.; TOMIYAMA, T, (eds). **Intelligent CAD Systems I**. Berlim, Germany, Springer-Verlag, 1987.
- ten HAGEN, P.J.W.; VEERKAMP, P.J., (eds). **Intelligent CAD Systems III**. Berlim, Germany, Springer-Verlag, 1990.
- TIPLER, Paul A. **Física para Cientistas e Engenheiros**. Tradução de Horácio Macedo. Rio de Janeiro, Brasil, Livros Técnicos e Científicos Editora SA, 1995.
- THORNTON, Anna C. Use of constraint-based design knowledge to improve the search for feasible designs. **Engineering Applications of Artificial Intelligence** v 9 n 4 Aug 1996. p 393-402. MUKHERJEE, A.; LIU, C.R. Representation of function-form relationship for the conceptual design of stamped metal parts. **Research in Engineering Design** v 7 n 4 1995. p 253-269.
- THURSTON, D.C.; CARNAHAM, J.U. Fuzzy ratings and utility analysis in preliminary design evaluation of multiple attributes. **Journal of Mechanical Design - Transactions of the ASME**, v 144 n 4 Dec 1992. p 648-658.
- TOMIYAMA, T. & YOSHIKAWA, H. Extended General Design Theory. **Design Theory for CAD**. H. Yoshikawa & E. Warman (eds.). Amsterdam, The Neederlands, North-Holland, 1987. p 95-124.
- ULMANN, David G. **The Mechanical Design Process**. New York, USA, McGraw-Hill Inc, 1992.
- UMEDA, Yasushi; ISHII, Masaki; YOSHIOKA, Masaharu; SHIMOMURA, Yoshiki; TOMIYAMA, Tetsuo. Supporting conceptual design based on the function-behavior-state modeler. **Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM**, v 10 n 4 Sep 1996. p 275-288.
- VANWELKENHUYSEN, Johan. Using DRE to augment generic conceptual design. **IEEE Expert** v 10 n 1 Feb 1995. p 50-56.
- VDI-GKE (Verein Deutscher Ingenieure - professional engineers' body). **VDI Guideline 2221, systematic approach to the design of technical systems and products**. Dusseldorf, Germany, VDI Verlag, 1987.

- WALDRON, Manjula B. Understanding Design. **Intelligent CAD, II**. H. Yoshikawa & T. Holden (Eds). Amsterdam, The Neederlands, North-Holland, 1990.
- WALDRON, Manjula B. Design Processes and Intelligent Computer-Aided Design (ICAD). **Intelligent CAD, III**. H. Yoshikawa, F. Arabab; T. Tomiyama (eds.). Amsterdam, The Neederlands, North-Holland, 1991. p 51-75.
- WANG, Q.; ZHU, J.Y.; SHU, Y.Q.; RAO, M.; CHUANG, K.T. Intelligent design environment for conceptual process design. **Engineering Applications of Artificial Intelligence** v 8 n 2 Apr 1995a. p 115-127.
- WANG, Qun; RAO, Ming; ZHOU, Ji. Intelligent Systems Approach to Conceptual Design. **International Journal of Intelligent Systems** v 10 n 3 Mar 1995b. p 259-293.
- WATERMAN, Donald A. **A Guide to Expert Systems**. Reading, USA, Addison-Wesley Publishing Company, 1986.
- WATERMAN, Donald A.; KLAHR, Philip (eds). **Expert Systems: techniques, tools and applications**. Reading, USA, Addison-Wesley Publishing Company, 1986.
- WARS, P.Z.; FLOE, K. (eds). **Between Mind and Computer: fuzzy science and engineering**. Singapore, World Scientific, 1993.
- WELCH, Richard V.; DIXON, John R. Representing function, behavior and structure during conceptual design. **3th International Conference on Design Theory and Methodology** (Proceedings). New York, USA, ASME, 1992. p 11-18.
- WINSTON, Patrick, Henry. **Artificial Intelligence**. Reading, USA, Addison-Wesley Publishing Company, 1993.
- WOODSON, Thomas T. **Introduction to Engineering Design**. New York, USA, Mc-Graw Hill Book Company, 1966.
- YOSHIKAWA, H. Design Philosophy: the state of the art. **CIRP Annals**, 38 (2), 1989. p 579-586.
- YOSHIKAWA, H. General Design Theory as a Formal Theory of Design. **Intelligent CAD, I**. H. Yoshikawa & D. Gossard (eds.). Amsterdam, The Neederlands, North-Holland, 1989. p 51-61.
- YOSHIKAWA, H.; GOSSARD, D.C., (eds). **Intelligent CAD, I**. Amsterdam, The Neederlands, North-Holland, 1989.
- YOSHIKAWA, H.; HOLDEN, T., (eds). **Intelligent CAD, II**. Amsterdam, The Neederlands, North-Holland, 1990.
- YOSHIKAWA, H.; ARBAB, F., (eds). TOMIYAMA, T., (managing ed). **Intelligent CAD, III**. Amsterdam, The Neederlands, North-Holland, 1991.
- ZADEH, Lofti A.; KACPRZYK, Janusz (eds). **Fuzzy Logic for the Management of Uncertainty**. New York, USA, John Wiley & Sons, 1992.



Anexo 1 - Verbos Técnicos Cadastrados

ALMEIDA, Francisco José de. *Sistematização e Automação do Ambiente de Projeto: o Enfoque da Sintaxe*. São Carlos, SP. Novembro de 1997.

Verbo	Sinônimos			Grandeza
abafar	silenciar	cobrir		sinal
abaixar	conduzir	reduzir		materia
abalroar	encostar			materia
abanar	oscilar	ventilar		materia
abarrotar	acumular			materia
abastecer	acumular	prover		materia
abaular	dobrar			materia
abetumar	lubrificar			materia
abobadar	dobrar			materia
abolir	cessar			materia
abotoar	unir	fechar		materia
abraçar	unir			materia
abrandar	reduzir	retificar		materia
abranger	unir	montar		materia
abrigar	isolar			materia
abrir	separar	interromper		materia
absorver				sinal
acabar		finalizar	apurar	materia
acasalar	unir			materia
acertar	consertar	posicionar		materia
acessar	ligar	alcançar		materia
achatar	prensar	nivelar		materia
achegar	alcançar	aproximar		materia
acionar	ligar	movimentar		sinal
acolher	receber			materia
acomodar	montar			materia
acondicionar	isolar			materia
acoplar	unir	ligar		materia
acrescentar		ampliar		materia
acrescer	ampliar			materia
acumular				materia
adaptar	acomodar	amoldar		materia
adequar	acomodar	amoldar		materia
aderir	unir			materia

ALMEIDA, Francisco José de. *Sistematização e Automação do Ambiente de Projeto: o Enfoque da Sintaxe*. São Carlos, SP. Novembro de 1997.

Verbo	Sinônimos				Grandeza
adiantar	conduzir	prolongar	estender		materia
adicionar	ampliar	unir			materia
afastar	isolar	dispersar			materia
aferir	comparar		avaliar		materia
afiar	separar				materia
afinar	afiar				materia
afixar	unir	firmar			materia
afrouxar	soltar				materia
afundar		introduzir			materia
agarrar	unir				materia
agitar	oscilar				materia
aglomerar	agrupar				materia
agregar	unir	montar			materia
agrupar					materia
aguçar	afiar				materia
ajeitar	acomodar	amoldar			materia
ajuntar	unir	montar	agrupar		materia
ajustar	acomodar		controlar	amoldar	materia
alargar	ampliar				materia
alcançar	conduzir	encostar			materia
alçar		eivar			materia
alicerçar	unir	firmar			materia
alimentar	prover				materia
alinhar	retificar			ordenar	materia
alisar	nivelar				materia
alojar	acomodar	amoldar			materia
alongar	ampliar				materia
alterar	modificar				materia
alternar			oscilar		materia
amaciar		abrandar			materia
amansar	reduzir	retificar			materia
amarrar	unir	firmar			materia
amassar	prensar				materia
amenizar	reduzir				materia

ALMEIDA, Francisco José de. *Sistematização e Automação do Ambiente de Projeto: o Enfoque da Sintaxe*. São Carlos, SP. Novembro de 1997.

Verbo	Sinônimos				Grandeza
amolar	afiar				materia
amoldar	conformar				materia
amolecer	derreter				materia
amontoar	acumular	agrupar			materia
amortecer	reduzir	retificar			materia
amparar	firmar				materia
ampliar					materia
amplificar	ampliar				materia
analisar					materia
ancorar	unir	firmar			materia
andar				mover	materia
anexar	unir	ligar			materia
animar	estimular				materia
anotar		gravar			sinal
anular	parar				materia
apagar	consumir	desligar			materia
apalpar	tocar		analisar		materia
apanhar					materia
aparar	separar				materia
apear	abaixar	desembarcar			materia
apegar	unir				materia
apertar	unir	ligar	conformar		materia
aplainar	nivelar				materia
aplanar	nivelar				materia
aplicar	introduzir				materia
apoiar	firmar				materia
apontar	afiar	gravar		direcionar	materia
apor	colocar				materia
aprisionar	unir				materia
aproximar	agrupar				materia
aprumar	direcionar	retificar			materia
apurar	analisar		apurar		materia
aquecer	ampliar				materia
aqueentar	aquecer				materia

ALMEIDA, Francisco José de. *Sistematização e Automação do Ambiente de Projeto: o Enfoque da Sintaxe*. São Carlos, SP. Novembro de 1997.

Verbo	Sinônimos				Grandeza
arejar	ventilar	abrir			materia
armar	montar				materia
armazenar	acumular	absorver			materia
arquear		dobrar			materia
arrancar	separar				materia
arranjar	consertar	acomodar	ordenar		materia
arrastar	deslocar				materia
arrefecer	reduzir				materia
arremessar	lançar				materia
arriar	abaixar		vergar	desacumular	materia
arrombar	separar				materia
arrumar	acomodar	consertar	ordenar		materia
ascender		eivar			materia
asfixiar	silenciar	cobrir			sinal
aspergir	dispersar				materia
aspirar	absorver	atrair			materia
assar	aquecer				materia
assemelhar	igualar				materia
assentar	colocar				materia
assinalar	gravar				sinal
associar	unir	ligar	montar		materia
atar	unir	ligar			materia
atingir	alcançar				materia
atirar	lançar				materia
ativar	ligar				sinal
atrair	unir	agrupar			materia
atravessar		furar			materia
atrelar	unir				materia
atritar	friccionar				materia
aumentar	ampliar				materia
avaliar	analisar				materia
avançar	conduzir	prolongar	estender		materia
averiguar	analisar				materia
avisar	transmitir				materia

ALMEIDA, Francisco José de. *Sistematização e Automação do Ambiente de Projeto: o Enfoque da Sintaxe*. São Carlos, SP. Novembro de 1997.

Verbo	Sinônimos				Grandeza
avizinhar	agrupar				materia
avolumar	ampliar				materia
baixar	abaixar				materia
balançar	oscilar				materia
barrar	parar				materia
bascular	direcionar	descarregar			materia
bater	encostar				materia
besuntar	lubrificar				materia
bifurcar	separar	dispersar	dividir		materia
blindar				isolar	materia
bloquear		isolar	parar		materia
bombear	conduzir	pressurizar			materia
borrifar	dispersar				materia
brilhar	irradiar				materia
britar	moer				materia
broquear	furar	alargar			materia
brunir		cortar			materia
buscar	trazer		investigar		materia
cadenciar	regular			oscilar	materia
caiar		revestir			materia
calçar	firmar				materia
calcar	moer	prensar			materia
calcular			computar		sinal
cambiar	trocar				materia
capotar	direcionar	mover			materia
captar	agrupar				materia
capturar	prender	agrupar			materia
carregar	conduzir	movimentar			materia
catar	pegar				materia
cavar	furar	retirar			materia
ceder	abaixar		dobrar		materia
ceifar	separar				materia
centralizar	agrupar	posicionar			materia
centrar	agrupar	posicionar			materia

ALMEIDA, Francisco José de. *Sistematização e Automação do Ambiente de Projeto: o Enfoque da Sintaxe*. São Carlos, SP. Novembro de 1997.

Verbo	Sinônimos			Grandeza
cercar			restringir	materia
cercear		restringir		materia
cerrar	unir	isolar	parar	materia
cessar	interromper	isolar	parar	materia
chanfrar			cortar	materia
chapear	conformar			materia
chavetar	trocar			materia
chegar	alcançar	aproximar		materia
chocar	encostar	incubar		materia
chumbar	unir	firmar		materia
chupar	absorver	aspirar		materia
cilindrar	furar			materia
cimentar	unir	firmar		materia
circundar	conduzir	direcionar		materia
cisalhar	separar			materia
coagular	espessar			materia
coalhar	espessar			materia
coar	purificar			materia
cobrir		isolar		materia
colar	unir			materia
coleccionar	unir	acumular		materia
colher	apanhar	acumular		materia
colocar	montar	conduzir		materia
combinar	montar			materia
comparar				materia
compassar	regular		oscilar	materia
completar	finalizar			materia
compor	acomodar			materia
comprimir		apertar		materia
computar	comparar	avaliar	incluir	materia
comunicar	transmitir	ligar	propagar	materia
comutar	trocar			materia
concentrar	agrupar		montar	materia
concluir	finalizar			materia

ALMEIDA, Francisco José de. *Sistematização e Automação do Ambiente de Projeto: o Enfoque da Sintaxe*. São Carlos, SP. Novembro de 1997.

Verbo	Sinônimos			Grandeza	
condensar	agrupar			acumular	materia
conduzir					materia
conectar	unir	ligar			materia
conferir	comparar		avaliar		materia
confinar	restringir				materia
conformar	transformar		fabricar		materia
confrontar	comparar			impedir	materia
congelar	solidificar				materia
consertar	transformar				materia
conservar	isolar				materia
considerar	computar				materia
construir	montar	fabricar		compor	materia
consumir	desacumular				materia
contactar	ligar	unir			materia
contar			computar		materia
conter	acumular	parar	firmar		materia
contornar	conduzir				materia
contrair	reduzir	agregar			materia
controlar					energia
converter	transformar				materia
correr	deslocar	deslizar			materia
corrigir	consertar	direcionar			materia
corroer	oxidar				materia
cortar	separar	interromper			materia
couraçar				isolar	materia
cravar		unir	firmar		materia
crescer	ampliar				materia
criar	prover				materia
cronometrar	comparar		computar		materia
cunhar	conformar				materia
curvar		dobrar			materia
cuspir	expelir				materia
danificar	destruir				materia
decantar	purificar				materia

ALMEIDA, Francisco José de. *Sistematização e Automação do Ambiente de Projeto: o Enfoque da Sintaxe*. São Carlos, SP. Novembro de 1997.

Verbo	Sinônimos				Grandeza
decompor		desagregar			materia
decrecer	reduzir				materia
deformar	transformar				materia
degelar	derreter				materia
delimitar		restringir			materia
demarcar		restringir			materia
demolir	desmontar				materia
dentar			cortar	conformar	materia
depor	colocar				materia
depositar	colocar				materia
depurar	purificar				materia
derivar	desviar	dirigir			materia
derramar	escorrer				materia
derrapar	escorregar				materia
derreter	dissolver				materia
derrubar	desmontar				materia
desacumular					materia
desagregar	dividir				materia
desamarrar	separar				materia
desapertar	soltar				materia
desaquecer	arrefecer				materia
desarmar	desmontar			desligar	materia
desarranjar	desarrumar	oscilar			materia
desarrumar	oscilar				materia
desassociar		desagregar			materia
desatar	separar	interromper	dividir		materia
descarregar	desacumular		dispersar		materia
descascar	cortar				materia
descer	abaixar	desembarcar			materia
descongelar	degelar				materia
desembarcar	descer	apear			materia
desencadear	separar	interromper	dividir	conduzir	materia
desentulhar	retirar	desmontar			materia
desgastar	consumir	destruir			materia

ALMEIDA, Francisco José de. *Sistematização e Automação do Ambiente de Projeto: o Enfoque da Sintaxe*. São Carlos, SP. Novembro de 1997.

Verbo	Sinônimos			Grandeza
desimpedir	retirar	limpar		materia
desintegrar		desagregar		materia
desligar	separar	interromper		materia
deslizar	escorregar			materia
deslocar	conduzir	movimentar		materia
desmanchar	desmontar			materia
desmantelar	destruir	desmontar		materia
desmontar	dividir			materia
desobstruir	retirar	limpar		materia
desordenar	desarrumar	oscilar		materia
despachar	transmitir	conduzir		materia
despejar	escorrer			materia
desprender	separar	interromper		materia
destacar	separar			materia
destampar	abrir			materia
destilar	purificar			materia
destruir	dividir			materia
desunir	separar	interromper		materia
desviar	direcionar		evitar	materia
deter	parar	firmar		materia
deteriorar	oxidar			materia
determinar	computar			materia
diferenciar	modificar			materia
diferir	divergir		dividir separar	materia
difratar	desviar			materia
difundir		propagar		materia
dilatar	ampliar			materia
diminuir	reduzir			materia
direcionar				materia
dirigir	direcionar	controlar		materia
disparar	lançar		iniciar	materia
dispersar				materia
disponibilizar	prover			materia
dispor	colocar	prover		materia

ALMEIDA, Francisco José de. *Sistematização e Automação do Ambiente de Projeto: o Enfoque da Sintaxe*. São Carlos, SP. Novembro de 1997.

Verbo	Sinônimos				Grandeza
disseminar		dispersar			materia
dissipar	dispersar				materia
dissociar		desagregar			materia
dissolver				dissociar	materia
distanciar	dispersar				materia
distender	ampliar				materia
distribuir			dispersar	conduzir	materia
divergir		direcionar	dispersar		materia
dividir					materia
dobrar	deformar				materia
dosar	controlar				materia
dressar	afiar				materia
ebulir	agitar				materia
edificar	montar	fabricar			materia
eleva	conduzir	aumentar			materia
eliminar	consumir	lançar			materia
embalar	balançar	empacotar	mover		materia
embaralhar	misturar				materia
embeber	absorver	acumular			materia
emborcar	direcionar	mover			materia
embrulhar	isolar				materia
embutir	introduzir				materia
emendar	unir				materia
emitir					sinal
empacotar	isolar				materia
empapar	embeber				materia
empilhar	acumular				materia
empunhar	unir	firmar			materia
empurrar	conduzir				materia
encadear	unir	ligar	montar	conduzir	materia
encaixar	acomodar	introduzir			materia
encaminhar	conduzir				materia
encerrar	finalizar	armazenar			materia
enchacar	embeber				materia

ALMEIDA, Francisco José de. *Sistematização e Automação do Ambiente de Projeto: o Enfoque da Sintaxe*. São Carlos, SP. Novembro de 1997.

Verbo	Sinônimos				Grandeza
encher	acumular				materia
encobrir		isolar			materia
encolher	reduzir				materia
encompridar	ampliar				materia
encostar	unir	montar			materia
en cravar	unir	firmar			materia
encurtar	reduzir				materia
en curvar		dobrar			materia
endireitar	consertar	direcionar			materia
endurecer	agrupar				materia
enferrujar	oxidar				materia
enfiar	introduzir				materia
enganchar	unir	montar	firmar		materia
engastar	unir	firmar			materia
engatar	unir	montar	firmar		materia
engolir	absorver	aspirar			materia
engraxar	lubrificar				materia
engrenar			conduzir		materia
engrossar	agrupar	ampliar			materia
enlatar	isolar				materia
enrijecer	agrupar				materia
ensaiar	analisar			testar	materia
ensopar	embeber				materia
entalar	unir	firmar			materia
entalhar			cortar		materia
enterrar	unir	firmar	cobrir	introduzir	materia
entornar	escorrer				materia
entortar	conformar	virar			materia
entrar	furar	introduzir			materia
enumerar	computar				materia
envasar	encher	entornar	empacotar		materia
envernizar	isolar				materia
enviar	transmitir	conduzir			materia

ALMEIDA, Francisco José de. *Sistematização e Automação do Ambiente de Projeto: o Enfoque da Sintaxe*. São Carlos, SP. Novembro de 1997.

Verbo	Sinônimos			Grandeza
envolver	isolar	unir		materia
enxugar	secar			materia
equilibrar	estabilizar			materia
equiparar	comparar			materia
erguer		elevantar		materia
esburacar	furar			materia
escarear	furar	alargar		materia
escavar	furar	retirar		materia
escoar	escorrer			materia
escolher	dividir			materia
escorar	firmar			materia
escorregar	conduzir			materia
escorrer	conduzir			materia
esfregar	friccionar			materia
esfriar	arrefecer			materia
esgotar	consumir			materia
esmagar	moer	prensar		materia
esmerilhar		cortar		materia
esmigalhar	moer			materia
espalhar	dispersar			materia
espelhar	emitir	isolar		materia
espessar	agrupar			materia
espremer		apertar		materia
esquentar	aquecer			materia
estabilizar	retificar	firmar		materia
estampar	conformar			materia
estender	ampliar			materia
esticar	ampliar			materia
estimular		incutir	oscilar	materia
estirar	ampliar			materia
estragar	destruir			materia
estreitar	reduzir			materia
estufar	ampliar			materia
evaporar	dissipar		desacumular	materia

Verbo	Sinônimos			Grandeza	
evitar	parar	isolar		materia	
examinar	analisar			materia	
excitar	estimular		oscilar	materia	
excluir	consumir			separar	materia
expandir	ampliar		propagar	materia	
expedir	transmitir	conduzir		materia	
expelir	dispersar			materia	
experimentar	analisar			materia	
expulsar	expelir			materia	
expurgar	purificar			materia	
extinguir	consumir	parar		materia	
extrair	retirar			materia	
fabricar	transformar			materia	
fazer			fabricar	materia	
fechar	parar			isolar	materia
fender	separar	dividir		materia	
filtrar	purificar			materia	
finalizar	parar			materia	
fincar	unir	firmar		materia	
findar	finalizar			materia	
firmar				materia	
fixar	unir	firmar		materia	
fletir	deformar			materia	
flexionar	deformar			materia	
fluir	escorrer			materia	
folgar	soltar			materia	
forjar	conformar			materia	
formar	conformar			materia	
fornecer	prover			materia	
fracionar		desagregar		materia	
fragmentar		desagregar		materia	
freiar	parar		controlar	materia	
fresar	fabricar			materia	
friccionar	conduzir	encostar		materia	

ALMEIDA, Francisco José de. *Sistematização e Automação do Ambiente de Projeto: o Enfoque da Sintaxe*. São Carlos, SP. Novembro de 1997.

Verbo	Sinônimos				Grandeza
funcionar	ligar	iniciar			sinal
fundir	unir	ligar	derreter	montar	materia
furar	separar	dividir			materia
galvanizar		isolar			materia
gastar	consumir				materia
gelar	arrefecer				materia
gerar	prover				materia
girar	mover	dirigir			materia
gravar	armazenar				sinal
grudar	unir				materia
guardar	acumular	absorver	isolar		materia
guiar	direcionar	levar	controlar		materia
içar		elevar			materia
igualar	nivelar				materia
imantar		ordenar	transformar		materia
imergir		introduzir			materia
imobilizar	parar	firmar			materia
impedir		isolar	parar		materia
impelir	expelir	empurrar		induzir	materia
impossibilitar		parar	separar	isolar	materia
imprensar	conformar				materia
imprimir	conformar				materia
impulsionar	expelir	empurrar			materia
incapacitar		parar	isolar		materia
inchar	ampliar				materia
inclinat	direcionar				materia
incluir	unir	montar	ampliar		materia
incorporar	unir	montar	ampliar		materia
incrementar	ampliar				materia
incubar					materia
incutir	induzir		ampliar		materia
induzir				conduzir	materia
inflar	ampliar				materia
informar	transmitir				materia

Verbo	Sinônimos			Grandeza	
iniciar			conduzir	materia	
inserir	introduzir			materia	
inspecionar		examinar		materia	
instigar	induzir			materia	
intercalar	introduzir			materia	
interferir			controlar	dirigir	materia
interromper				sinal	
intervir			controlar	dirigir	materia
introduzir	montar	agrupar		materia	
invalidar	parar			materia	
inverter	trocar	mudar		materia	
investigar	analisar			materia	
irradiar	emitir			materia	
isolar				materia	
juntar	unir	acumular		materia	
justapor	unir	montar		materia	
laminar	conformar			materia	
lançar	expelir			materia	
lapidar	polir	cortar		materia	
largar	soltar			materia	
lavar	purificar			materia	
levantar		eivar		materia	
levar	conduzir	movimentar		materia	
liberar	separar	interromper		desobstruir	materia
libertar	separar	interromper		materia	
ligar				sinal	
limar		cortar		materia	
limitar	controlar	parar		materia	
limpar	purificar			materia	
liqüefazer	derreter			materia	
lixar		cortar		materia	
localizar	posicionar			materia	
locomover	conduzir	movimentar		materia	
lotar	acumular			materia	

ALMEIDA, Francisco José de. *Sistematização e Automação do Ambiente de Projeto: o Enfoque da Sintaxe*. São Carlos, SP. Novembro de 1997.

Verbo	Sinônimos				Grandeza
lubrificar	isolar				materia
lustrar	polir	cortar			materia
macerar	moer	prensar			materia
magnetizar		ordenar	transformar		materia
magnificar	ampliar				materia
mandar		conduzir	transmitir		materia
manejar			conduzir	dirigir	materia
manipular	conduzir	dirigir			materia
manter	firmar	acumular	isolar		materia
manufaturar	fabricar				materia
manusear			conduzir	dirigir	materia
marcar	gravar				sinal
martelar	prensar				materia
medir	comparar		computar		sinal
mergulhar		introduzir			materia
meter	introduzir				materia
mexer	movimentar		misturar		materia
minguar			abaixar	desacumular	materia
minimizar	reduzir				materia
misturar	montar				materia
modelar		traçar	conformar		materia
moderar	regular		compassar		materia
modificar	transformar				materia
modular			alternar	oscilar	materia
moer	dividir				materia
moldar	conformar				materia
molificar	derreter				materia
montar	unir	ligar			materia
mover	conduzir	movimentar			materia
movimentar	conduzir	agitar			materia
mudar	modificar	movimentar			materia
munir	prover				materia
nivelar	retificar				materia
observar		examinar			materia

ALMEIDA, Francisco José de. *Sistematização e Automação do Ambiente de Projeto: o Enfoque da Sintaxe*. São Carlos, SP. Novembro de 1997.

Verbo	Sinônimos				Grandeza
obstruir		parar		isolar	materia
ocultar		isolar			materia
olear	lubrificar				materia
operar	manipular	controlar			materia
ordenar	retificar				materia
orientar	direcionar				materia
oscilar					materia
oxidar	consumir	danificar			materia
paralisar	parar	firmar			materia
parar					materia
partir	separar	interromper	dividir	conduzir	materia
passar	conduzir	transmitir			materia
patinar	escorregar				materia
pegar	unir				materia
pelar	cortar				materia
pender	virar			abaixar	materia
pendurar	unir				materia
peneirar	selecionar				materia
penetrar	furar	introduzir			materia
percorrer				conduzir	materia
perfurar		furar			materia
permutar	trocar				materia
persuadir	induzir				materia
perturbar	agitar	oscilar		desarrumar	materia
pesar	comparar	computar			materia
pintar		revestir			materia
plainar	nivelar				materia
podar	separar				materia
polarizar	ordenar	transformar			materia
polir		cortar			materia
por	colocar				materia
posicionar	direcionar	conduzir			materia
pregar	unir	firmar			materia
premer	unir	ligar			materia

ALMEIDA, Francisco José de. *Sistematização e Automação do Ambiente de Projeto: o Enfoque da Sintaxe*. São Carlos, SP. Novembro de 1997.

Verbo	Sinônimos				Grandeza
prender	unir	firmar			materia
prensar	conformar				materia
preservar	isolar				materia
pressionar	apertar				materia
pressurizar	conduzir	comprimir			materia
procurar	investigar				materia
produzir	prover	fabricar			materia
proibir		parar			materia
prolongar	ampliar				materia
propagar	dispersar				materia
proporcionar	prover				materia
prosseguir				conduzir	materia
proteger	isolar				materia
prover	transformar				energia
provisionar	prover	acumular			materia
pulverizar	dispersar				materia
puncionar	conformar	furar			materia
purificar	dividir	separar			materia
puxar	alongar		arrancar	trazer	materia
quebrar	separar	dividir			materia
rachar	separar	dividir			materia
ralar	moer			friccionar	materia
ramificar	dividir	dispersar			materia
raspar	cortar				materia
rebaixar	abaixar			raspar	materia
rebarbar		cortar			materia
rebitar	unir	firmar			materia
recalcar	prensar	conter			materia
receber	acumular	absorver			materia
receptar	receber				materia
reclinar	direcionar	dobrar			materia
recobrir		isolar			materia
recolher	acumular	mover			materia
recortar	separar				materia

ALMEIDA, Francisco José de. *Sistematização e Automação do Ambiente de Projeto: o Enfoque da Sintaxe*. São Carlos, SP. Novembro de 1997.

Verbo	Sinônimos			Grandeza
recuar		conduzir	agregar	materia
recuperar	consertar			materia
recurvar	dobrar			materia
reduzir				materia
refinar	purificar			materia
refletir	emitir	isolar		materia
refratar	desviar			materia
refrear		parar		materia
refrescar	arrefecer			materia
refrigerar	arrefecer			materia
regenerar	consertar			materia
registrar		gravar		sinal
regressar		agrupar	direcionar	materia
regular	igualar		controlar	materia
relaxar	soltar			materia
reluzir	irradiar			materia
remendar	consertar			materia
remover	retirar	limpar		materia
reparar	consertar			materia
repartir	separar	dividir		materia
repelir	dispersar	isolar		materia
represar	conter			materia
reprimir			parar	materia
resfriar	arrefecer			materia
restaurar	consertar	direcionar		materia
restringir	parar	isolar	conter	materia
reter	acumular	parar	firmar	materia
retificar	brunir			materia
retilinar	retificar			materia
retirar	desacumular	dispersar		materia
retrair		recuar	encolher	materia
reunir	unir	agrupar		materia
revestir		isolar		materia
revezar	oscilar			materia

ALMEIDA, Francisco José de. *Sistematização e Automação do Ambiente de Projeto: o Enfoque da Sintaxe*. São Carlos, SP. Novembro de 1997.

Verbo	Sinônimos				Grandeza
revolver	conduzir	movimentar			materia
riscar	conduzir				materia
roçar	cortar	friccionar			materia
rodar	mover	dirigir			materia
rolar	mover		dirigir		materia
romper	separar	interromper			materia
sacar	retirar				materia
sacudir	oscilar				materia
salpicar	dispersar				materia
salvar	isolar	armazenar			materia
saturar	encher				materia
secar		evaporar			materia
sedimentar		cobrir	colar		materia
segregar	separar	dividir			materia
seguir			dirigir	conduzir	materia
segurar	firmar				materia
selecionar	dividir	separar			materia
separar					materia
serrar	separar				materia
silenciar	reduzir				materia
sincronizar	igualar				materia
sintetizar	agregar	transformar			materia
sintonizar	igualar				materia
sobrepôr	ampliar	montar			materia
soldar	unir				materia
solidificar	agrupar		firmar		materia
soltar	separar	interromper			materia
somar	ampliar				materia
sondar	analisar				materia
sortir	prover				materia
sorver	absorver	aspirar			materia
suavizar	retificar		reduzir		materia
subir		elevar			materia
submergir		introduzir			materia

ALMEIDA, Francisco José de. *Sistematização e Automação do Ambiente de Projeto: o Enfoque da Sintaxe*. São Carlos, SP. Novembro de 1997.

Verbo	Sinônimos				Grandeza
substituir	trocar				materia
subtrair	desacumular			reduzir	materia
suceder	oscilar				materia
sufocar	silenciar	cobrir			sinal
sugar	absorver	aspirar			materia
suportar	firmar				materia
suprimir	retirar				materia
suspender	interromper	parar	elegar		materia
sustentar	firmar				materia
talhar	espessar	cortar			materia
tampar		parar		isolar	materia
tapar	parar			isolar	materia
tatear	tocar		analisar		materia
terminar	finalizar				materia
testar	comparar	computar			materia
tirar	retirar				materia
tocar	ligar	unir			materia
tombar	virar			abaixar	materia
torcer	conformar	virar			materia
tomear	fabricar				materia
tosquiar	separar				materia
traçar	conduzir				materia
tragar	absorver	atrair			materia
trancar	parar		isolar		materia
transferir	conduzir	transmitir	movimentar		materia
transformar					materia
transladar	conduzir	movimentar			materia
transmitir					sinal
transportar	conduzir	movimentar			materia
trazer			agrupar		materia
triturar	moer				materia
trocar	transformar				materia
ungir	lubrificar				materia
unir					materia

ALMEIDA, Francisco José de. *Sistematização e Automação do Ambiente de Projeto: o Enfoque da Sintaxe*. São Carlos, SP. Novembro de 1997.

Verbo	Sinônimos				Grandeza
untar	lubrificar				materia
usinar	fabricar				materia
vaporizar	evaporar	ebulir			materia
variar				oscilar	materia
vazar	escorrer			furar	materia
vedar	isolar	parar			materia
ventilar	empurrar				materia
vergar	dobrar				materia
verificar	examinar				materia
verter	escorrer				materia
vibrar	oscilar				materia
virar	direcionar				materia
volatilizar		evaporar			materia
voltar		agrupar	direcionar		materia
zincar		isolar			materia

Anexo 2 - Princípios Físicos Cadastrados

ALMEIDA, Francisco José de. *Sistematização e Automação do Ambiente de Projeto: o Enfoque da Sintaxe*. São Carlos, SP. Novembro de 1997.

Princípio físico	Função elementar	Causa	Conseqüência
Descrição:			

Atrito	mudar direção	energia	força	força
O deslocamento de um corpo atritando sobre outro provoca uma força na direção oposta ao deslocamento, proporcional ao Coeficiente de Atrito entre as superfícies dos corpos e à força normal entre eles. (Tipler, 1985:125)				

Conservação de Energia Mecânica potencial/cinética	transformar	energia	deslocamento	velocidade
A soma das energias cinética e potencial de um corpo, ou seja, a energia mecânica total, permanece constante quando se aplicam apenas forças conservativas. (Tipler, 1985:172)				

Conservação de Energia Mecânica cinética/potencial	transformar	energia	velocidade	deslocamento
A soma das energias cinética e potencial de um corpo, ou seja, a energia mecânica total, permanece constante quando se aplicam apenas forças conservativas. (Tipler, 1985:172)				

Lei de Hooke deslocamento/força	transformar	energia	deslocamento	força
O deslocamento de uma mola, compressão ou tração, faz surgir uma força proporcional a este deslocamento, no sentido inverso e proporcional à constante de mola. (Tipler, 1985:123)				

Lei de Hooke força/deslocamento	transformar	energia	força	deslocamento
Uma força aplicada numa mola provoca um deslocamento da mesma, compressão ou tração, proporcional a esta força, no mesmo sentido e proporcional à constante de mola. (Tipler, 1985:123)				

Tensão Superficial	juntar	matéria	força	deslocamento
Forças atrativas entre moléculas de um fluido (força coesiva) ou forças atrativas entre uma molécula no líquido e as moléculas em outra substância (força atrativa). (Tipler, 1985: 372)				

Equação de Bernoulli velocidade/pressão	transformar	energia	velocidade	pressão
A pressão de um fluido é inversamente proporcional à sua velocidade (vazão). (Tipler, 1985: 372)				

Equação de Bernoulli pressão/velocidade	transformar	energia	pressão	velocidade
A velocidade (vazão) de um fluido é inversamente proporcional à pressão aplicada. (Tipler, 1985: 372)				

Efeito Doppler redução	reduzir	energia	freqüência	freqüência
Movimento relativo do receptor em direção contrária à fonte reduz a freqüência de onda recebida pelo receptor. (Tipler, 1985:401)				

ALMEIDA, Francisco José de. *Sistematização e Automação do Ambiente de Projeto: o Enfoque da Sintaxe*. São Carlos, SP. Novembro de 1997.

Princípio físico	Função elementar	Causa	Conseqüência
Descrição:			

Efeito Doppler ampliação	ampliar	energia	freqüência	freqüência
Movimento relativo do receptor em direção à fonte amplia a freqüência de onda recebida pelo receptor. (Tipler, 1985:401)				

Difração	dispersar	matéria	pressão	pressão
Uma abertura em uma barreira com tamanho menor que o comprimento de uma onda que incide sobre ela tende a atuar com uma fonte puntiforme da mesma onda. (Tipler, 1985:439)				

Lei de Boyle e Mariotte pressão/volume reduzir	reduzir	matéria	pressão	deslocamento
À temperatura constante, aumento na pressão a que um gás é submetido provoca uma diminuição proporcional de seu volume. (Tipler, 1985: 468)				

Lei de Boyle e Mariotte pressão/volume ampliar	ampliar	matéria	pressão	deslocamento
À temperatura constante, diminuição na pressão a que um gás é submetido provoca um aumento proporcional de seu volume. (Tipler, 1985: 468)				

Lei de Boyle e Mariotte volume/pressão ampliar	ampliar	energia	deslocamento	pressão
À temperatura constante, a diminuição do volume de um gás provoca um aumento proporcional de sua pressão. (Tipler, 1985: 468)				

Lei de Boyle e Mariotte volume/pressão reduzir	reduzir	energia	deslocamento	pressão
À temperatura constante, o aumento do volume de um gás provoca uma diminuição proporcional de sua pressão. (Tipler, 1985: 468)				

Lei da Gravitação Universal deslocamento/força	juntar	matéria	deslocamento	força
Dois corpos atraem-se mutuamente com uma força proporcional à Constante Universal de Gravitação e às suas massas e inversamente proporcional à distância entre eles. (Tipler, 1985: 117)				

Lei da Gravitação Universal força/deslocamento	juntar	matéria	força	deslocamento
Dois corpos atraem-se mutuamente com uma força proporcional à Constante Universal de Gravitação e às suas massas e inversamente proporcional à distância entre eles. (Tipler, 1985: 117)				

ALMEIDA, Francisco José de. *Sistematização e Automação do Ambiente de Projeto: o Enfoque da Sintaxe*. São Carlos, SP. Novembro de 1997.

Princípio físico	Função elementar	Causa	Conseqüência
Descrição:			

Princípio de Arquimedes deslocamento/força	transformar	energia	deslocamento	força
Um corpo, total ou parcialmente imerso num fluido, sofre um empuxo para cima igual ao peso do volume de fluido deslocado. (Tipler, 1985: 367)				

Princípio de Arquimedes força/deslocamento	transformar	energia	força	deslocamento
Um corpo, total ou parcialmente imerso num fluido, sofre um empuxo para cima igual ao peso do volume de fluido deslocado. (Tipler, 1985: 367)				

Segunda Lei de Newton força/deslocamento	transformar	energia	força	deslocamento
A variação do movimento de um corpo é proporcional à força motriz atuante e ocorre na direção retilínea em que a força é impressa. (Tipler, 1985:77)				

Segunda Lei de Newton força/aceleração	transformar	energia	força	aceleração
A variação do movimento de um corpo é proporcional à força motriz atuante e ocorre na direção retilínea em que a força é impressa. (Tipler, 1985:77)				

Lei dos Gases Ideais temperatura/pressão ampliar	ampliar	energia	temperatura	pressão
Um gás ideal, a volume constante, sofre um aumento de pressão proporcional ao aumento de temperatura efetuado. (Tipler, 1985: 470)				

Lei de Poiseuille	reduzir	energia	deslocamento	deslocamento
Característica que todo fluido apresenta de oferecer resistência ao deslocamento. (Tipler, 1985: 379)				

Lei dos Gases Ideais temperatura/pressão reduzir	reduzir	energia	temperatura	pressão
Um gás ideal, a volume constante, sofre uma diminuição de pressão proporcional à diminuição de temperatura efetuada. (Tipler, 1985: 470)				

Lei dos Gases Ideais temperatura/volume reduzir	reduzir	matéria	temperatura	deslocamento
Um gás ideal, a pressão constante, sofre uma diminuição de volume proporcional à diminuição de temperatura efetuada. (Tipler, 1985: 470)				

ALMEIDA, Francisco José de. *Sistematização e Automação do Ambiente de Projeto: o Enfoque da Sintaxe*. São Carlos, SP. Novembro de 1997.

Princípio físico	Função elementar	Causa	Conseqüência
Descrição:			

Lei dos Gases Ideais temperatura/volume ampliar	ampliar	matéria	temperatura	deslocamento
Um gás ideal, a pressão constante, sofre um aumento de volume proporcional ao aumento de temperatura efetuado. (Tipler, 1985: 470)				

Lei dos Gases Ideais pressão/temperatura reduzir	reduzir	energia	pressão	temperatura
Um gás ideal, a volume constante, sofre uma redução de temperatura proporcional à redução de pressão efetuada. (Tipler, 1985: 470)				

Lei dos Gases Ideais pressão/temperatura ampliar	ampliar	energia	pressão	temperatura
Um gás ideal, a volume constante, sofre um aumento de temperatura proporcional ao aumento de pressão efetuado. (Tipler, 1985: 470)				

Lei dos Gases Ideais volume/temperatura ampliar	ampliar	energia	deslocamento	temperatura
Um gás ideal, a pressão constante, sofre um aumento de temperatura proporcional à diminuição de volume efetuada. (Tipler, 1985: 470)				

Lei dos Gases Ideais volume/temperatura reduzir	reduzir	energia	deslocamento	temperatura
Um gás ideal, a pressão constante, sofre uma redução de temperatura proporcional ao aumento de volume efetuado. (Tipler, 1985: 470)				

Lei Zero da Termodinâmica	transmitir	energia	temperatura	temperatura
Quando dois corpos se encostam, o calor passa sempre do corpo mais quente para o corpo mais frio. (Tipler, 1985: 478)				

Primeira Lei da Termodinâmica corrente/temperatura	transformar	energia	corrente elétrica	temperatura
A energia injetada num sistema é igual à soma do trabalho feito pelo sistema mais a variação de energia interna do sistema. (Tipler, 1985: 485)				

Primeira Lei da Termodinâmica deslocamento/temperatura	transformar	energia	deslocamento	temperatura
A energia injetada num sistema é igual à soma do trabalho feito pelo sistema mais a variação de energia interna do sistema. (Tipler, 1985: 485)				

ALMEIDA, Francisco José de. *Sistematização e Automação do Ambiente de Projeto: o Enfoque da Sintaxe*. São Carlos, SP. Novembro de 1997.

Princípio físico	Função elementar	Causa	Consequência
Descrição:			

Primeira Lei da Termodinâmica nuclear/temperatura	transformar	energia	radiação nuclear	temperatura
A energia injetada num sistema é igual à soma do trabalho feito pelo sistema mais a variação de energia interna do sistema. (Tipler, 1985: 485)				

Expansão Térmica	ampliar	matéria	temperatura	deslocamento
Quando a temperatura de um corpo se eleva, o corpo usualmente se expande. (Tipler, 1985: 485)				

Contração Térmica	reduzir	matéria	temperatura	deslocamento
Quando a temperatura de um corpo se abaixa, o corpo usualmente se contrai. (Tipler, 1985: 485)				

Condução Térmica	transmitir	energia	temperatura	temperatura
Num estado permanente, há uma transferência de temperatura entre a região quente e a fria, proporcional à área da seção de passagem e à diferença de temperatura e inversamente proporcional à distância entre as regiões. (Tipler, 1985: 513)				

Convecção Térmica	transmitir	energia	temperatura	temperatura
O transporte direto de uma massa provoca também o transporte de uma quantidade de calor. (Tipler, 1985: 513)				

Lei de Stefan-Boltzmann (Radiação Térmica)	transmitir	energia	radiação eletromagnética	temperatura
Um corpo irradia energia térmica proporcionalmente à sua área e à quarta potência de sua temperatura absoluta. (Tipler, 1985: 518)				

Lei do Deslocamento de Wein	emitir	energia	temperatura	luz
Derivada da Lei de Stefan-Boltzmann, acima de uma dada temperatura, um corpo aquecido passa a emitir radiação térmica a um comprimento de onda visível (luz). (Tipler, 1985: 518)				

Lei do Resfriamento de Newton	reduzir	energia	temperatura	temperatura
A taxa de resfriamento de um corpo é aproximadamente proporcional à diferença de temperatura entre o corpo e suas vizinhanças. (Tipler, 1985: 519)				

Lei da Conservação da Carga	transmitir	energia	deslocamento	corrente elétrica
A carga elétrica é transferida entre corpos através do atrito. (Tipler, 1985: 599)				

Princípio físico	Função elementar	Causa	Conseqüência	
Descrição:				
Lei de Coulomb força/deslocamento atração	juntar	matéria	força	deslocamento
Dois corpos atraem-se mutuamente com uma força proporcional à Constante da Lei de Coulomb e às suas cargas elétricas, desde que de sinais opostos, e inversamente proporcional à distância entre eles. (Tipler, 1985: 119/600)				
Lei de Coulomb força/deslocamento repulsão	separar	matéria	força	deslocamento
Dois corpos repelem-se mutuamente com uma força proporcional à Constante da Lei de Coulomb e às suas cargas elétricas, desde que de mesmo sinal, e inversamente proporcional à distância entre eles. (Tipler, 1985: 600)				
Lei de Coulomb deslocamento/força atração	juntar	matéria	deslocamento	força
Dois corpos atraem-se mutuamente com uma força proporcional à Constante da Lei de Coulomb e às suas cargas elétricas, desde que de sinais opostos, e inversamente proporcional à distância entre eles. (Tipler, 1985: 119/600)				
Lei de Coulomb deslocamento/força repulsão	separar	matéria	deslocamento	força
Dois corpos repelem-se mutuamente com uma força proporcional à Constante da Lei de Coulomb e às suas cargas elétricas, desde que de mesmo sinal, e inversamente proporcional à distância entre eles. (Tipler, 1985: 600)				
Campo Elétrico	transformar	energia	radiação eletro- magnética	força
Uma carga elétrica sob ação de um campo elétrico recebe uma força proporcional à sua carga e ao campo elétrico. (Tipler, 1985: 603/616)				
Dipolo Elétrico	guiar	energia	radiação eletro- magnética	deslocamento
Uma molécula polar sob um campo elétrico sofre um momento proporcional à carga da molécula polar e à distância entre o centro da carga negativa e o centro da carga positiva. (Tipler, 1985: 617)				
Condutor Elétrico	ligar	energia	corrente elétrica	corrente elétrica
Elementos químicos que apresentam átomos com elétrons livres permitem a condutividade destes elétrons por todo o material. (Tipler, 1985: 636)				
Isolante Elétrico	isolar	energia	corrente elétrica	corrente elétrica
Elementos químicos que apresentam átomos sem elétrons livres (poucos elétrons) funcionam como isolantes entre duas porções carregadas eletricamente. (Tipler, 1985: 636)				

ALMEIDA, Francisco José de. *Sistematização e Automação do Ambiente de Projeto: o Enfoque da Sintaxe*. São Carlos, SP. Novembro de 1997.

Princípio físico	Função elementar	Causa	Conseqüência
Descrição:			

Potencial Elétrico	guiar	matéria	voltagem	deslocamento
A diferença de potencial é o trabalho por unidade de carga necessário para deslocar uma carga de prova, à velocidade constante, de um ponto a outro. (Tipler, 1985: 647)				

Capacitância	acumular	energia	voltagem	voltagem
Dois condutores isolados entre si e ligados a um dispositivo carregador acumulam carga elétrica proporcional à diferença de voltagem e à área dos isolantes e inversamente proporcional à distância entre eles. (Tipler, 1985: 664)				

Lei de Ohm corrente/voltagem	transformar	energia	corrente elétrica	voltagem
A diferença de potencial entre dois pontos é proporcional à corrente no condutor. (Tipler, 1985: 686)				

Lei de Ohm voltagem/corrente	transformar	energia	voltagem	corrente elétrica
A diferença de potencial entre dois pontos é proporcional à corrente no condutor. (Tipler, 1985: 686)				

Lei de Joule	transformar	energia	corrente elétrica	temperatura
Quando há uma corrente elétrica num condutor, esta é continuamente convertida em energia térmica no mesmo. (Tipler, 1985: 689)				

Campo Magnético deslocamento/força	transformar	energia	deslocamento	força
Uma carga elétrica movimentando-se em um campo magnético sofre uma força proporcional à carga, à velocidade e à intensidade do campo magnético. (Tipler, 1985: 731)				

Campo Magnético radiação/força	transformar	energia	radiação eletromagnética	força
Uma carga elétrica movimentando-se em um campo magnético sofre uma força proporcional à carga, à velocidade e à intensidade do campo magnético. (Tipler, 1985: 731)				

Ímã em Campo Magnético	guiar	matéria	radiação eletromagnética	deslocamento
Um ímã permanente sob ação de um campo magnético tende a orientar-se de modo que o pólo norte aponte na direção do campo magnético. (Tipler, 1985: 733)				

Lei de Biot-Savart	transformar	energia	corrente elétrica	radiação eletromagnética
A indução magnética provocada por um elemento de corrente em um fio reto é proporcional à carga elétrica, ao comprimento do fio e inversamente proporcional à distância do centro do fio. (Tipler, 1985: 751)				

ALMEIDA, Francisco José de. *Sistematização e Automação do Ambiente de Projeto: o Enfoque da Sintaxe*. São Carlos, SP. Novembro de 1997.

Princípio físico	Função elementar	Causa	Conseqüência
Descrição:			

Campo de Dipolo de uma Espira	transformar	energia	corrente elétrica	radiação eletromagnética
O campo magnético criado por uma espira na qual passa uma corrente elétrica é proporcional à carga elétrica, ao comprimento da espira e ao número de espiras e inversamente proporcional à distância ao plano da espira. Além disso, o campo magnético é direcionado, perpendicular ao plano da espira. (Tipler, 1985: 754)				

Solenóide	transformar	energia	corrente elétrica	força
Uma série de espiras na qual passa uma corrente elétrica gera um campo magnético interno ao solenóide praticamente uniforme. (Tipler, 1985: 761)				

Lei de Faraday deslocamento/corrente	transformar	energia	deslocamento	corrente elétrica
Uma barra imantada deslocando-se em relação a uma espira, ou solenóide, induz na mesma uma corrente elétrica. (Tipler, 1985:779)				

Lei de Faraday radiação/força	transformar	energia	radiação eletromagnética	força
Uma barra imantada recebe uma força de uma espira, ou solenóide, devido ao momento magnético gerado pela espira, ou solenóide. (Tipler, 1985:780)				

Refração ampliar	ampliar	energia	luz	luz
A luz incidindo sobre uma lente biconvexa amplia a imagem. (Tipler, 1985:886)				

Refração reduzir	reduzir	energia	luz	luz
A luz incidindo sobre uma lente bicôncava reduz a imagem. (Tipler, 1985:887)				

Refração ampliar/agrupar	agrupar	energia	luz	luz
A incidência da luz sobre uma lente biconvexa agrupa os raios de luz. (Tipler, 1985:886)				

Refração reduzir/dispersar	dispersar	energia	luz	luz
A incidência da luz sobre uma lente bicôncava dispersa os raios de luz. (Tipler, 1985:886)				

Teoria Eletromagnética (onda magnética)	emitir	energia	deslocamento	radiação eletromagnética
Um dipolo elétrico oscilando harmonicamente com o tempo (distância de separação entre suas cargas) irradia energia em forma de ondas eletromagnéticas. (Tipler, 1985:855)				

Teoria Eletromagnética (luz)	emitir	energia	deslocamento	luz
Um dipolo elétrico oscilando harmonicamente com o tempo (distância de separação entre suas cargas) irradia energia em forma de ondas eletromagnéticas, que podem ser visíveis (luz). (Tipler, 1985:855)				

ALMEIDA, Francisco José de. *Sistematização e Automação do Ambiente de Projeto: o Enfoque da Sintaxe*. São Carlos, SP. Novembro de 1997.

Princípio físico	Função elementar	Causa	Consequência
Descrição:			

Lei da Reflexão onda magnética	mudar_direção	energia	radiação eletromagnética	radiação eletromagnética
O raio refletido está no plano de incidência e faz com a normal um ângulo, o ângulo de reflexão, que é igual ao ângulo do raio incidente com a normal, o ângulo de incidência. (Tipler, 1985:858)				

Lei da Reflexão luz	mudar_direção	energia	luz	luz
O raio refletido está no plano de incidência e faz com a normal um ângulo, o ângulo de reflexão, que é igual ao ângulo do raio incidente com a normal, o ângulo de incidência. (Tipler, 1985:858)				

Lei de Snell (Refração) luz	mudar_direção	energia	luz	luz
O raio refratado (transmitido) por uma fronteira entre dois meios sofre um desvio proporcional ao ângulo de incidência e à relação entre os índices de refração dos meios. (Tipler, 1985:860)				

Lei de Snell (Refração) onda magnética	mudar_direção	energia	radiação eletromagnética	radiação eletromagnética
O raio refratado (transmitido) por uma fronteira entre dois meios sofre um desvio proporcional ao ângulo de incidência e à relação entre os índices de refração dos meios. (Tipler, 1985:860)				

Campo Magnético (Transformador) ampliar	ampliar	energia	vtagem	vtagem
Dois solenóides enrolados num núcleo comum de material condutor permitem ampliar a vtagem entre os solenóides, em função do número de espiras de cada um deles. (Tipler, 1985:830)				

Campo Magnético (Transformador) reduzir	reduzir	energia	vtagem	vtagem
Dois solenóides enrolados num núcleo comum de material condutor permitem reduzir a vtagem entre os solenóides, em função do número de espiras de cada um deles. (Tipler, 1985:830)				

Reflexão ampliar	ampliar	energia	luz	luz
A luz incidindo sobre um espelho côncavo amplia a imagem. (Tipler, 1985:880)				

Reflexão reduzir	reduzir	energia	luz	luz
A luz incidindo sobre um espelho convexo reduz a imagem. (Tipler, 1985:880)				

Interferência Construtiva ondas	ampliar	energia	radiação eletromagnética	radiação eletromagnética
Duas ondas magnéticas superpostas, em fase, provocam interferência construtiva. (Tipler, 1985:902)				

ALMEIDA, Francisco José de. *Sistematização e Automação do Ambiente de Projeto: o Enfoque da Sintaxe*. São Carlos, SP. Novembro de 1997.

Princípio físico	Função elementar	Causa	Conseqüência
Descrição:			

Interferência Destrutiva ondas	reduzir	energia	radiação eletromagnética	radiação eletromagnética
Duas ondas magnéticas superpostas cujas fases diferem em 180 graus provocam interferência destrutiva. (Tipler, 1985:902)				

Interferência Destrutiva luz	reduzir	energia	luz	luz
Duas ondas luminosas superpostas cujas fases diferem em 180 graus provocam interferência destrutiva. (Tipler, 1985:902)				

Interferência Construtiva luz	ampliar	energia	luz	luz
Duas ondas luminosas superpostas, em fase, provocam interferência construtiva. (Tipler, 1985:902)				

Interferência Destrutiva	reduzir	energia	pressão	pressão
Duas ondas superpostas cujas fases diferem em 180 graus provocam interferência destrutiva. (Tipler, 1985:434)				

Interferência Construtiva	ampliar	energia	pressão	pressão
Duas ondas superpostas, em fase, provocam interferência construtiva. (Tipler, 1985:434)				

Temperatura Crítica	transmitir	energia	temperatura	corrente elétrica
A resistividade é nula abaixo de uma certa temperatura, conhecida como Temperatura Crítica. (Tipler, 1985: 688)				

Efeito Fotoelétrico	emitir	energia	luz	radiação nuclear
A luz incidindo sobre uma superfície metálica provoca a ejeção de elétrons. (Tipler, 1985: 853)				

Efeito Fotoelétrico cátodo/ânodo	emitir	energia	luz	corrente elétrica
A luz incidindo sobre uma superfície metálica (cátodo) provoca a ejeção de elétrons. Se alguns destes elétrons atingirem um ânodo, haverá corrente elétrica num circuito montado entre cátodo e ânodo. (Tipler, 1985: 973)				

Primeiro Postulado de Bohr radiação/luz	emitir	energia	radiação nuclear	luz
Um átomo irradia energia quando seu elétron, de uma forma ou outra, faz uma transição de um estado estacionário para outro estado estacionário. Esta energia pode ter um comprimento de onda visível (luz). (Tipler, 1985: 977)				

ALMEIDA, Francisco José de. *Sistematização e Automação do Ambiente de Projeto: o Enfoque da Sintaxe*. São Carlos, SP. Novembro de 1997.

Princípio físico	Função elementar	Causa	Conseqüência
Descrição:			

Primeiro Postulado de Bohr temperatura/luz	emitir	energia	temperatura	luz
Um átomo irradia energia quando seu elétron, de uma forma ou outra, faz uma transição de um estado estacionário para outro estado estacionário. Esta energia pode ter um comprimento de onda visível (luz). (Tipler, 1985: 977)				

Primeiro Postulado de Bohr radiação/onda	emitir	energia	radiação nuclear	radiação eletromagnética
Um átomo irradia energia quando seu elétron, de uma forma ou outra, faz uma transição de um estado estacionário para outro estado estacionário. (Tipler, 1985: 977)				

Primeiro Postulado de Bohr temperatura/onda	emitir	energia	temperatura	radiação eletromagnética
Um átomo irradia energia quando seu elétron, de uma forma ou outra, faz uma transição de um estado estacionário para outro estado estacionário. (Tipler, 1985: 977)				

Primeiro Postulado de Bohr radiação/radiação	emitir	energia	radiação nuclear	radiação nuclear
Um átomo irradia energia quando seu elétron, de uma forma ou outra, faz uma transição de um estado estacionário para outro estado estacionário. (Tipler, 1985: 977)				

Primeiro Postulado de Bohr temperatura/radiação	emitir	energia	temperatura	radiação nuclear
Um átomo irradia energia quando seu elétron, de uma forma ou outra, faz uma transição de um estado estacionário para outro estado estacionário. (Tipler, 1985: 977)				

Radioatividade	emitir	energia	radiação nuclear	radiação nuclear
Núcleos de elementos não estáveis são radioativos. (Tipler, 1985: 998)				

Fissão	emitir	energia	radiação nuclear	radiação nuclear
Quando um núcleo de um elemento é dividido em dois núcleos mais leves, há emissão de energia, proporcional à massa perdida. (Tipler, 1985: 1009)				

Fusão	emitir	energia	radiação nuclear	radiação nuclear
Quando dois núcleos de um elemento leve são unidos em um núcleo de elemento mais pesado, há emissão de energia proporcional à massa perdida. (Tipler, 1985: 1009)				

Segunda Lei de Newton deslocamento/força	transformar	energia	deslocamento	força
A variação do movimento de um corpo é proporcional à força motriz atuante e ocorre na direção retilínea em que a força é impressa. (Tipler, 1985:77)				

ALMEIDA, Francisco José de. *Sistematização e Automação do Ambiente de Projeto: o Enfoque da Sintaxe*. São Carlos, SP. Novembro de 1997.

Princípio físico	Função elementar	Causa	Conseqüência
Descrição:			

ruptura	separar	matéria	força	deslocamento
Uma força aplicada a um material que provoque uma tensão maior que a de ruptura do mesmo provocará uma separação de uma parte dele.				

contato	transmitir	matéria	força	força
Dois corpos colocados em contato permitem a transmissão de uma força (potência) entre eles.				

armazenagem	acumular	matéria	deslocamento	deslocamento
Um recipiente qualquer permite a armazenagem de outro material de densidade maior que a dele.				

ruptura (calor)	separar	matéria	temperatura	deslocamento
Uma força aplicada a um material que provoque uma tensão maior que a de ruptura do mesmo provocará uma separação de uma parte dele.				

isolamento mecânico	reduzir	energia	pressão	pressão
Um material disposto entre uma fonte de ruído e seu receptor diminui a quantidade de ruído recebido pelo receptor				