

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA MECÂNICA

**SISTEMA ESPECIALISTA PROTÓTIPO PARA AUXÍLIO À
VERIFICAÇÃO DA ESTRUTURA DE PRODUTO DE
MOTORES ELÉTRICOS**

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

para a obtenção do grau de

MESTRE PROFISSIONAL EM ENGENHARIA MECÂNICA

DERLI ARLEI MASSIRER

Florianópolis, dezembro de 2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

EM ENGENHARIA MECÂNICA

**SISTEMA ESPECIALISTA PROTÓTIPO PARA AUXÍLIO À
VERIFICAÇÃO DA ESTRUTURA DE PRODUTO DE
MOTORES ELÉTRICOS**

DERLI ARLEI MASSIRER

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de


MESTRE PROFISSIONAL EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA


Sendo aprovada em sua forma final.



Prof. Fernando Cabral, PhD.
Coordenador do POSMEC



Prof. André Ogliari, Dr. Eng.
Coordenador Acadêmico do Curso




Prof. Jonny Carlos da Silva, Dr. Eng.
Orientador

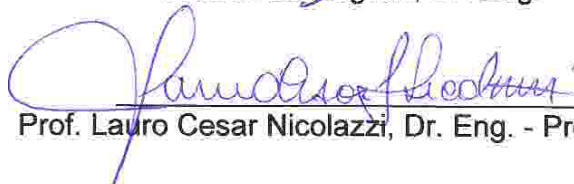
BANCA EXAMINADORA



Prof. Acires Dias, Dr. Eng.



Prof. André Ogliari, Dr. Eng.



Prof. Lauro Cesar Nicolazzi, Dr. Eng. - Presidente

Dedico esta dissertação à minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

A Universidade Federal de Santa Catarina.

A UNERJ.

*Ao Professor **Jonny Carlos da Silva** por sua competente orientação, por acreditar em meu potencial profissional, por ter abordado o tema Sistemas Especialistas e assim vislumbrado a oportunidade de aplicação na referida empresa.*

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, os quais tive o prazer de interagir, pelas discussões e ensinamentos.

A empresa na qual este estudo foi desenvolvido e aos especialistas, pelo tempo e informações dispensadas.

Em especial aos especialistas Orlando Sanson Júnior e Jaimor José Perito que acreditaram no projeto.

Aos amigos e àqueles que direta ou indiretamente contribuíram com o presente trabalho.

Em especial meu amigo Francisco que me acompanhou nas viagens para cursar a disciplina na UFSC e me incentivou para realização deste trabalho.

A minha mãe Isolde e ao meu pai Arni pelo apoio e pela educação que me proporcionou estar hoje concluindo mais esta fase.

Ao meus irmãos César e Laerte que torceram por mim.

Ao meu sogro Adair por suas palavras de incentivo.

Em especial, a minha esposa pela compreensão, cobrança, incentivo e carinho.

E a minha filha de um ano, simplesmente por existir.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	ii
LISTA DE QUADROS.....	iii
LISTA DE TABELAS.....	iv
LISTA DE ABREVIATURAS.....	v
RESUMO.....	vi
ABSTRACT.....	vii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Processo de Projeto na Empresa Alvo.....	4
1.2 Justificativa do Trabalho.....	8
1.2.1 Justificativa para utilizar a técnica de Sistemas Especialistas.....	9
1.2.2 Viabilidade de aplicação de Sistemas Especialistas.....	10
1.2.3 Ferramenta utilizada no desenvolvimento do sistema	13
1.3 Objetivos do Trabalho	14
1.3.1 Objetivo Geral.....	14
1.3.2 Objetivos Específicos.....	14
1.4 Resultados Esperados.....	14
1.5 Estrutura do Trabalho.....	15
2 PROCESSO DE PROJETO DE MOTORES ELÉTRICOS.....	17
2.1 Uma visão geral dos motores de indução trifásicos.....	17
2.2 Detalhes construtivos de Motores Elétricos de Indução Trifásicos.....	21
2.3 Cenário de projeto e a atividade de verificação da estrutura.....	26
2.4 O processo de desenvolvimento de produtos na empresa alvo.....	28
2.4.1 Classificação dos projetos quanto à inovação tecnológica.....	32
2.4.2 Sistemas de Informação envolvidos nas fases do processo de projeto.....	33
2.5 O processo de projeto e a estrutura do produto (BOM).....	38
2.5.1 Tipos de BOM e sua utilização no motor elétrico.....	39
2.5.2 Variações da BOM e BOM única.....	40
2.5.3 A Utilização de Item fantasma e pseudo-item.....	41
2.6 Justificativa da relevância do problema.....	44
2.7 Resumo do capítulo.....	45
3 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E SISTEMAS ESPECIALISTAS.....	47
3.1 A História da Inteligência Artificial e dos Sistemas Especialistas.....	47

3.2 Definições a respeito dos Sistemas Especialistas (SE).....	50
3.2.1 O Engenheiro do Conhecimento e o Especialista Humano.....	52
3.3 Os elementos de um Sistema Especialista.....	54
3.3.1 Base de conhecimento.....	54
3.3.2 Memória operacional.....	55
3.3.3 Máquina de inferência.....	55
3.3.4 Módulo de aquisição do conhecimento.....	58
3.3.5 Módulo de explanação.....	58
3.3.6 Interface com o usuário.....	59
3.3.7 Base de conhecimento, regras e controle de execução	59
3.4 Modelos de desenvolvimento de um Sistema Especialista.....	62
3.4.1 O modelo desenvolvimento incremental.....	64
3.4.2 Riscos e atividades no desenvolvimento de Sistemas Especialistas.....	64
3.4.3 Aquisição e Organização do Conhecimento.....	67
3.4.4 Fase inicial de desenvolvimento do sistema SEVME.....	68
3.5 Resumo do capítulo.....	73
4 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA ESPECIALISTA PROTÓTIPO – SEVME	75
4.1 Estrutura geral e interfaces de comunicação.....	75
4.1.1 Interface para entrada de dados.....	76
4.1.2 Uso sistemático do protótipo e a simplificação da interface.....	78
4.1.3 Estrutura geral do protótipo.....	80
4.2 Base de conhecimento, estrutura de classes e regras.....	82
4.2.1 Estrutura de classes do sistema especialista protótipo.....	83
4.3 Arquivo de saída, casos implementados e resultados obtidos.....	88
4.4 Verificação e Validação do protótipo.....	95
4.5 Resumo do capítulo.....	99
5 CONTRIBUIÇÕES, RECOMENDAÇÕES E CONCLUSÕES.....	100
5.1 Contribuições.....	100
5.2 Recomendações e trabalhos futuros.....	101
5.3 Conclusões.....	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	104
APÊNDICE 1.....	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Fluxo de informações entre os Departamentos de Vendas e Engenharia de Produtos.....	5
Figura 2.1 - Motor Elétrico de indução trifásico – Linha Well.....	18
Figura 2.2 - Motor Elétrico de indução monofásico.....	19
Figura 2.3 - Universo tecnológico de motores elétricos.....	19
Figura 2.4 - Vista explodida de um motor elétrico com carcaça totalmente fechada.....	21
Figura 2.5 - Motor com carcaça aberta.....	23
Figura 2.6 - Nomenclatura do motor a partir da medição da altura H.....	23
Figura 2.7 - Sistema de vedação de motor elétrico.....	25
Figura 2.8 - Atividade de verificação no processo de projeto.....	26
Figura 2.9 - Fases do processo de desenvolvimento do produto.....	29
Figura 2.10 - Principais resultados das fases segundo o Modelo Unificado do Processo de Desenvolvimento do Produto.....	30
Figura 2.11 - Macro visão dos sistemas de informação envolvidos no processo desenvolvimento de produtos da empresa.....	34
Figura 2.12- Exemplo de conjunto de mancal dianteiro de motor elétrico.....	37
Figura 2.13 - Conjunto tampa dianteira de motor elétrico.....	42
Figura 2.14 - Conjunto Rotor completo de um motor elétrico.....	43
Figura 3.1 - Elementos típicos de um sistema especialista.....	54
Figura 3.2- Estrutura da regra de controle central	61
Figura 3.3- Processo de desenvolvimento de sistemas especialistas.....	62
Figura 3.4- Hierarquia do conhecimento.....	67
Figura 4.1 - Interfaces de comunicação com o sistema SEVME.....	80
Figura 4.2 - Estrutura de classes inicial do protótipo.....	83
Figura 4.3 - Exemplo de resultado de verificação gerado pelo sistema SEVME.....	89
Figura 4.4 - Desenho ilustrativo da medida de prensagem do rotor no eixo do motor.....	91
Figura 4.5 -Simulação de colisão devido a erro na medida de prensagem.....	91
Figura 4.6 - Interferência de montagem do eixo em relação ao anel interno, rolamento e sistema de vedação.....	93
Figura 4.7 - Tabela Excel com exemplo de registros gerados pelo sistema SEVME.....	93
Figura 4.8 - Resultado de uma execução do sistema na fase de Verificação.....	96
Figura A1.1 - Desenho de conjunto de aprovação.....	109
Figura A1.2 - Exemplo de arquivo .XML	110

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Fases da macrofase de desenvolvimento.....	31
Quadro 2.2 - Tipos de Bom.....	40
Quadro 3.1 - Fatos da história da Inteligência Artificial.....	48
Quadro 3.2 - Sistemas Especialistas e fatos importantes a partir de 1970.....	49
Quadro 3.3 – Exemplos de aquisição de dados e forma de pensamento do especialista.....	60
Quadro 3.4 - Questionamentos iniciais para aquisição de conhecimento – parte 1.....	71
Quadro 3.5 - Questionamentos para aquisição de conhecimento – parte 2.....	73
Quadro 4.1 - Exemplo de aquisição de dados e forma de pensamento do especialista....	86
Quadro A1.1 - Regra auxiliar para verificar a medida de prensagem.....	111
Quadro A1.2 -Regras para verificar a medida de prensagem.....	112
Quadro A1.3 -Regras para verificar assento rolamento	113
Quadro A1.4 -Classe dados geral.....	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Tipos de proteção para equipamentos para áreas de risco.....	22
Tabela 2.2 - Exemplos de graus de proteção.....	24
Tabela 2.3 - Fases do processo de desenvolvimento de projeto na empresa alvo.....	35
Tabela 2.4 - Exemplo de um conjunto de tampa dianteira de motor elétrico.....	41
Tabela 2.5 - Origem e porcentagem dos erros de projeto durante o ano de 2005.....	44
Tabela 2.6 - Reclamações internas causadas por erros de projeto no ano 2005.....	45
Tabela 3.1 - Análise de risco das principais atividades no desenvolvimento de um software de sistema especialista.....	63
Tabela 3.2 - Principais etapas no desenvolvimento de SE.....	65
Tabela 3.3 - Principais erros identificados como candidatos a implementação no SEVME.	72
Tabela 4.1 - Classes de componentes de motor elétrico.....	88
Tabela 4.2 - Número de ocorrências dos casos verificados pelo SEVME.....	94
Tabela A1.1 - 1º Algarismo do grau de proteção.....	107
Tabela A1.2 - 2º Algarismo do grau de proteção.....	107
Tabela A1.3 - Exemplo de resultado de uma configuração de produto.....	108

LISTA DE ABREVIATURAS

IA	- Inteligência Artificial
BOM	- Bill of Material (Lista de materiais)
CAD	- Computed Aided Design
CLIPS	- “C” Language Integrated Productions System
CRM	- Customer Relationship Management
EC	- Engenheiro do Conhecimento
EH	- Especialista Humano
ERP	- Enterprise Resource Planning
PDM	- Product Data Management
PDP	- Processo de desenvolvimento de produtos
SAC	- Solicitação de Ação Corretiva
SAP	- Soluções em Aplicações e Produtos
SE	- Sistema Especialista
SEVME	- Sistema Especialista Verificador de Motores Elétricos
SME	- Sistema de desenhos de conjunto de aprovação de Motores Elétricos
SSCs	- Sistemas, subsistemas e componentes
TFVE	- Totalmente fechados com ventilação externa

RESUMO

O trabalho apresenta os resultados obtidos no desenvolvimento incremental de um sistema especialista protótipo, o qual tem por objetivo ser utilizado como ferramenta auxiliar na tarefa de verificação da estrutura de produto de um motor elétrico. Analisa o processo de projeto e os conceitos relacionados ao PDP (Processo de Desenvolvimento de Produtos), o qual neste trabalho está relacionado ao projeto de motores elétricos para os quais são apresentados conceitos e detalhes construtivos. Também focaliza na atividade de verificação de projeto com foco na estrutura de produto que é o principal objeto relacionado ao estudo, mostrando as conseqüências da manipulação de dados deste objeto.

Aborda conceitos relacionados a sistemas especialistas e a análise de viabilidade que serviu de base para decisão de utilizar sistemas especialistas. O texto mostra o modelo de desenvolvimento incremental adotado, demonstrando a capacidade de expansão conferida ao sistema pelo uso de modelagem orientada a objetos.

O trabalho também apresenta aspectos relativos à etapa de representação do conhecimento, uma proposta alternativa ao habitual processo de entrada de dados utilizada em sistemas especialistas e a ferramenta *Shell* utilizada na implementação. São demonstrados ainda os dados de saída resultantes da execução do sistema e o processo de verificação e validação do protótipo.

O procedimento de uso do sistema adotado e os resultados obtidos por meio no número de ocorrências dos casos de erros de projeto identificados os quais permitem avaliar a qualidade dos projetos liberados e identificar a necessidade de capacitação. Finalmente são apresentadas contribuições, benefícios para a empresa, recomendações para trabalhos futuros e as conclusões finais.

Palavras-chaves: Motores Elétricos, Sistema Especialista, Verificação de Projeto

ABSTRACT

The work presents the results obtained from the incremental development of an expert system prototype to be used as supporting tool for the design verification of the electrical motor product structure- represented by Bill of Material.

It analyzes the design process and the concepts related to PDP- Product Development Process- are also presented. The focus is the design verification, using the Bill of Material, showing the consequences of its manipulation.

The work deals with expert system concepts, and the feasibility analysis used as starting point for the project. The text demonstrates the incremental development model applied, with its capacity to expand the system through the application of Object-Oriented Modeling.

This project also takes into consideration the knowledge representation phase, and brings an alternative for the conventional process of interaction between the user and the prototype. The system outcomes are also discussed, with the users' evaluation during the verification and validation phase.

The results from the prototype application allow to evaluate the quality of the current design outputs and to identify the need for training. Finally, the work presents the main contributions, benefits for the company with suggestions for future projects in this research topic.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Numa economia onde a única certeza é a incerteza, apenas o conhecimento é fonte segura de vantagem competitiva. Quando os mercados mudam, as tecnologias proliferam, os concorrentes se multiplicam e os produtos se tornam obsoletos quase da noite para o dia, poucas são as empresas que alcançam o sucesso. As empresas de sucesso são aquelas que, de forma consistente, criam novos conhecimentos, disseminam-nos profundamente em toda organização e rapidamente os incorporam em novas tecnologias e produtos. Essas atividades caracterizam a empresa “*criadora de conhecimento*” cujo negócio exclusivo é a inovação contínua (*On Knowledge Managment/Hardvard Business Review, 2000*).

A sobrevivência no mundo globalizado faz com que empresas tenham que definir estratégias para conquistar sua fatia, ter capacidade de reagir e adaptar-se às mudanças, acompanhar a evolução e tendências apontadas pelo mercado.

A capacidade de adaptação e reação é uma necessidade que transcende todas as áreas de uma empresa, desde vendas, *marketing*, suprimentos, planejamento de produção, logística, engenharia de qualidade, de processos industriais e engenharia de produtos entre outras áreas. A engenharia de produtos, no processo de projeto, é peça fundamental na expansão da empresa e para isso conta com a mão-de-obra e conhecimento especializado dos projetistas e engenheiros que têm a difícil tarefa de transformar necessidade de mercado e requisitos de clientes em produtos competitivos.

Rozenfeld et al. (2006) apresentam a importância da empresa ter uma boa gestão do PDP (Processo de Desenvolvimento de Produtos). O desenvolvimento de produtos, segundo Rozenfeld et al. (2006), é considerado um processo de negócio cada vez mais crítico para a competitividade das empresas, principalmente com a

crecente internacionalização dos mercados, aumento da diversidade e variedade de produtos e redução do ciclo de vida dos produtos no mercado.

Desde objetos mais simples até produtos complexos, o ser humano tem projetado produtos por milhares de anos e cada objeto é resultado de um longo e muitas vezes difícil processo de projeto. Independente do tipo e complexidade do produto há certas técnicas que podem ser utilizadas durante o processo de projeto para ajudar o projetista atingir os resultados esperados.

O que imprime ao ser humano a necessidade de estudar o processo de projeto, uma vez que há milhares de produtos já desenvolvidos e operantes? Simplesmente a necessidade contínua da busca pelo novo, de melhorar a relação custo/ benefício, de aumentar a qualidade dos produtos e tornar-se mais competitivo. Atualmente os produtos têm se tornado cada vez mais complexos exigindo no processo de desenvolvimento a composição de equipes com pessoas de diversas áreas do conhecimento.

Quanto maior a quantidade de pessoas envolvidas no projeto, maior a necessidade de boa comunicação e estruturação do projeto para que nada tire o foco principal. Neste ritmo, a globalização da economia e dos mercados exige das empresas o desenvolvimento de novos produtos cada vez mais rápido com um processo de projeto do produto muito eficiente e eficaz. A busca pelo desenvolvimento com rapidez aliada à capacidade acelerada de adaptação às mudanças, compõe o cenário do projetista moderno.

O projetista durante suas atividades, transforma idéias em produtos que serão utilizados pelos clientes. Esses produtos são o resultado da combinação de pessoas e seu conhecimento, ferramentas, habilidades e sua criatividade. A atividade de projetar exige tempo, mão-de-obra, dinheiro, materiais e máquinas. Se as pessoas forem capacitadas em suas tarefas, tiverem um ambiente de trabalho adequado e as ferramentas necessárias, o produto será concluído com eficácia e eficiência.

Em outros tempos, uma única pessoa projetava, fabricava e controlava a produção. A medida em que a complexidade dos produtos e processos de fabricação aumentava, essa pessoa não possuía mais as habilidades e conhecimentos necessários para envolver tudo que cercava o produto, com isto diferentes grupos de pessoas se responsabilizaram por vendas e *marketing*, projeto, fabricação e gerenciamento. Nesta evolução se chegou ao que hoje é conhecido

como processo de desenvolvimento de produtos (PDP). Rozenfeld et al. (2006), apresentam com propriedade todos os conceitos e aspectos relacionados a este tema. O PDP deve integrar desde atividades do planejamento estratégico e competitivo da empresa até a descontinuidade ou retirada do produto do mercado. O processo de desenvolvimento envolve diversos profissionais de diferentes áreas da empresa, cada um vendo o produto por uma perspectiva diferente, mas complementar.

Na integração entre as áreas algumas informações podem ser perdidas ou distorcidas. Por exemplo, vendas e *marketing* recebem informações do mercado, estas são repassadas e comunicadas de maneira escrita ou até mesmo verbal ao setor de projeto. Projetistas interpretam estas informações, que são usadas como requisitos de clientes. A área de desenvolvimento de produtos desenvolve conceitos, especificações, desenhos, listas de materiais e instruções de montagem. Estas especificações são repassadas ao setor de fabricação, que efetivamente confecciona o produto. O repasse de informações dentro de uma empresa nem sempre é eficaz, podendo resultar em diferenças entre o que foi solicitado e o que foi produzido e entregue ao cliente.

Toda essa cadeia aponta para um produto de pouca qualidade, com alto custo e risco para a empresa. De forma direta ou indireta está sempre relacionada ao processo de projeto do produto, afetando a qualidade do produto pela sua capacidade em executar as funções a que se propõe em conformidade com as especificações dos clientes. O custo é afetado pelo tempo gasto, pelos materiais utilizados e conseqüentemente influenciando nos processos produtivos necessários para atender as especificações do projeto do produto. Estima-se que 85% dos problemas em novos produtos que não operam como deveriam, demoram mais para chegar ao mercado ou custam além do previsto, estão relacionados ao processo de projeto (ULLMAN, 2003). Segundo Rozenfeld et al. (2006), uma parcela significativa, algo em torno de 85% dos custos do ciclo de vida de um produto, é reflexo da fase de projeto, ou seja, fica determinado em função do que é definido no projeto (tecnologias básicas do produto e do processo, materiais, especificações etc).

Com objetivo de minimizar todos estes impactos e otimizar as atividades de projeto, as empresas têm utilizado ferramentas computacionais como as já tradicionais ferramentas CAD (*Computer Aided Design*) que são ferramentas para

auxílio no projeto do produto. Além das ferramentas CAD, um outro grupo que tem se destacado nesta função são os Sistemas Especialistas.

Os sistemas especialistas têm sua origem nos conceitos de inteligência artificial. A inteligência artificial pode ser definida como:

“Um ramo da ciência da computação que se dedica à automação de comportamento inteligente” (LUGER & STUBBLEFIELD, 1993).

GIARRATANO & RILEY (1994), citam a definição de sistemas especialistas do Prof. Edward Feigenbaum da Universidade de Stanford:

“Um programa de computador inteligente que usa conhecimento e procedimentos de inferência para resolver problemas que são difíceis o suficiente para necessitar de especialistas humanos para sua solução”

Apresentar os conceitos e demonstrar, através de um protótipo, a viabilidade de utilização de sistemas especialistas, como uma ferramenta auxiliar na atividade verificação da estrutura de produtos de motores elétricos, é o objetivo principal deste trabalho. Para que se entenda melhor esta necessidade apresenta-se o processo de projeto na empresa alvo e no item 1.2 a justificativa do trabalho.

O presente trabalho é a conclusão de um curso de mestrado profissionalizante realizado em parceria entre a empresa WEG Indústrias S/A e a Universidade Federal de Santa Catarina- UFSC. A WEG Indústrias S/A será doravante denominada nas citações deste trabalho como a empresa-alvo.

1.1 Processo de projeto na empresa alvo

Conforme a empresa cresce, aumentam os volumes de produção e a necessidade de produtos novos e diferenciados. Por outro lado, o número de colaboradores envolvidos não aumenta na mesma proporção e velocidade, com isto diminui-se o tempo disponível, porém necessário, aos setores considerados administrativos em fornecer respostas. Assim ocorre no Departamento de Engenharia do Produto da WEG Indústrias S/A – divisão Motores, que recebe informações na forma de pedidos do Departamento de Vendas e *Marketing*. A área de projeto do produto é responsável por transformar as necessidades dos clientes em uma solução capaz de ser confeccionada pelo Departamento de Produção.

Pode-se afirmar que o Departamento de Engenharia do Produto recebe como dados de entrada as especificações do produto, oriundas do contato realizado pelos profissionais de vendas com os clientes. Nos casos de desenvolvimento de nova linha de produtos ou introdução de novas tecnologias, outros Departamentos da empresa como *Marketing*, engenharias de Pesquisa e Desenvolvimento, de processos industriais e da qualidade, entre outros, integram na busca de soluções. No trabalho diário e corriqueiro, o projetista não necessariamente cria algo novo, mas concebe a solução que atende ao cliente pelo uso de componentes já existentes. Ao final desse processo de detalhamento do produto, o projetista terá confeccionado desenhos, lista de componentes (estrutura de produto), especificações técnicas e de montagem, entre outros.

A Figura 1.1 ilustra este fluxo de informações entre os Departamentos de Vendas e Engenharia do Produto da empresa alvo. A parte tracejada que representa a base de dados, o desenho do conjunto é de responsabilidade dos Departamentos de Vendas e serve como entrada para o Departamento de Engenharia do Produto.

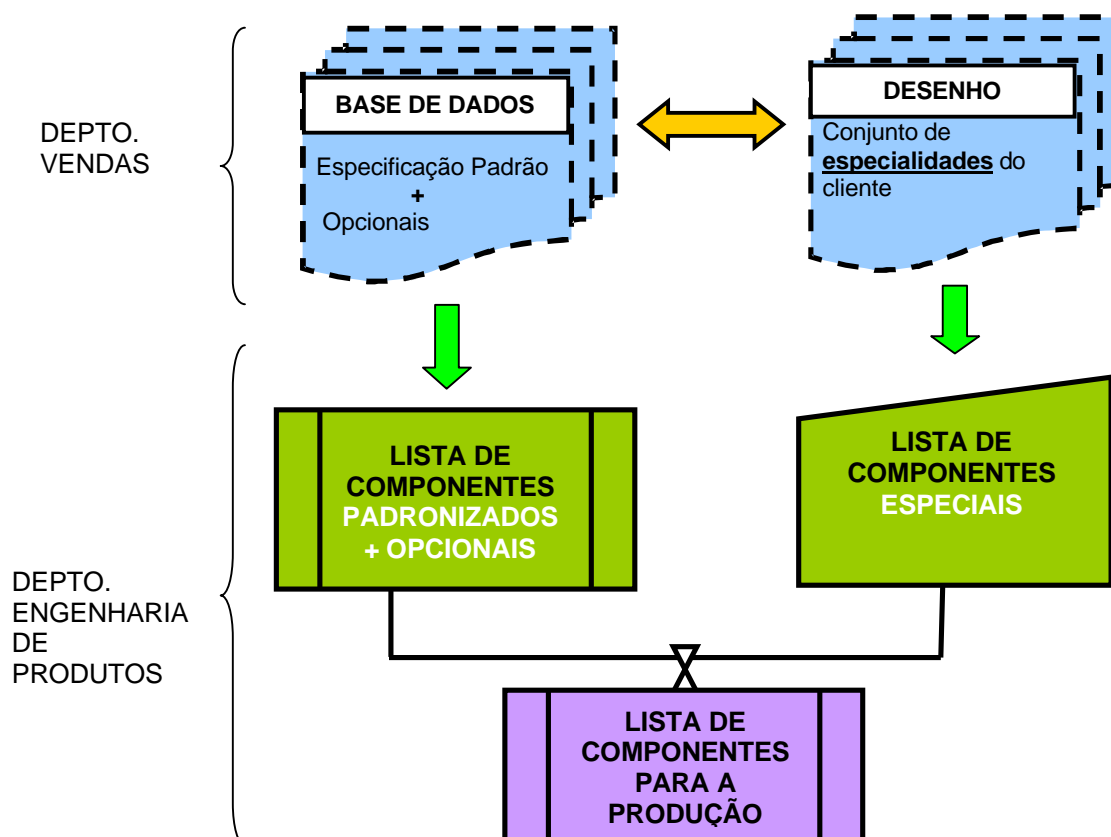


Figura 1.1: Fluxo de informações entre os Departamentos de Vendas e Engenharia de Produtos.

A partir dessa **base de dados**, o Departamento de Engenharia utiliza um *software* PDM (*Product Data Management*), de desenvolvimento interno da empresa, o qual tem como uma de suas funcionalidades a geração automática da lista de componentes padrões ou opcionais disponíveis para linha do produto. Esta lista é gerada através de um processo de seleção no qual as especificações de vendas que estão inseridas na base de dados são a fonte de informação considerada neste processo. Caso o cliente necessite uma característica especial, diferente da especificação padrão ou dos opcionais disponíveis, o Departamento de Vendas solicita a elaboração de um **desenho**. Este **desenho** contém o conjunto dos requisitos especiais solicitadas ao produto para atender necessidades específicas do cliente.

Esse desenho de conjunto é encaminhado ao cliente para sua aprovação e posterior confirmação do pedido de compra e venda. Este conjunto de informações, **base de dados** e **desenho**, serve como entrada para a Engenharia do Produto. No caso de um produto ser configurado apenas com os componentes padronizados e opcionais disponíveis, uma lista de componentes é automaticamente gerada e o produto não passa pela avaliação da Engenharia do Produto, já que o sistema PDM se encarrega de gerar e disponibilizar a estrutura do produto (lista de componentes) no sistema ERP (*Enterprise Resource Planning*) da empresa.

Caso o produto possua uma ou mais características especiais, diferente das especificações padronizadas e opcionais disponíveis, o Departamento de Engenharia do Produto deve verificar no **desenho** quais são estas características especiais e selecionar os componentes para atendê-las. No caso da inexistência de componentes capazes de satisfazer tais exigências, ou do projetista não encontrá-los no sistema, estes serão projetados e especificados para atender àquela solicitação. Vale mencionar que a forma do Departamento de Engenharia do Produto identificar a necessidade de componentes diferente dos padronizados e opcionais disponíveis se inicia através da leitura e interpretação dos requisitos constantes no desenho de aprovação do cliente.

As características especiais não se encontram disponíveis no sistema e devem efetivamente ser lidas e interpretadas a partir do desenho para todo e qualquer produto que possua características diferentes do padrão ou dos opcionais disponíveis. Uma linha de produtos que vem sendo produzida há vários anos, gera em sua base de dados, uma infinidade de componentes já desenhados e

especificados, com item de produção e aptos a serem produzidos. Para produtos que são variações de projeto, ou seja, não requerem algo totalmente novo, a tarefa de selecionar entre componentes já existentes um que cumpra a função requisitada, acaba se tornando uma tarefa chave para o sucesso e qualidade da atividade de detalhamento de projeto.

Considere o exemplo de um equipamento que operará em condições de elevada umidade no ambiente, sujeito a respingos e jatos de água. O projetista tem a função de, com sua experiência, selecionar as vedações mais apropriadas para o caso. Nesse ambiente, outros requisitos devem ser atendidos, por exemplo, pintura externa diferenciada e parafusos especiais, entre outros. Ratifica-se com o exemplo que cabe ao projetista a tarefa de seleção de componentes para atender às características especiais necessárias, cumprindo as recomendações e especificações do cliente ou de normas regulamentadoras.

Caso o projetista possua pouca experiência e dentro das características que deveria inserir ao produto, esqueceu-se por exemplo, dos parafusos especiais. A cadeia produtiva é capaz de identificar esta falha? O inspetor de qualidade confrontará a especificação do produto com a lista de componentes e terá conhecimento para identificar o erro? Muitas vezes isso ocorre, porém, entre aproximadamente vinte projetos diários elaborados, verificados e expedidos por cada projetista do Departamento de Engenharia do Produto, trata-se de algo nada fácil para um ser humano sujeito a executar a mesma tarefa repetidas vezes ao dia.

O processo de projeto é composto pela atividade de análise dos requisitos de projeto, identificação dos materiais (componentes) que atendem aos requisitos, especificação de desenhos de componentes e finalmente a criação da lista de todos os componentes que formam a estrutura do produto. Pode-se dizer que a estrutura de um produto é uma forma de organizar em níveis os materiais utilizados desde a matéria prima até a montagem final do produto. Esta estrutura permite que se possa determinar um planejamento da produção destes materiais.

Torna-se quase evidente, que criar um sistema computacional capaz de reproduzir estas tarefas repetitivas, de revisar na estrutura de produto considerando os componentes (especiais), só pode trazer benefícios aos usuários do sistema. Esse sistema, que caso necessário além de informar as incoerências consiga

explicar seu diagnóstico, servirá ao projetista como ferramenta de auxílio na tarefa de verificação na fase de projeto detalhado de motores elétricos industriais.

1.2 Justificativa do Trabalho

A justificativa para se desenvolver um protótipo de sistema especialista para auxiliar na tarefa de verificação da estrutura de produto será respondida com o entendimento dos pontos abaixo:

- **Qual a importância da BOM (*Bill Of Material*, estrutura de produto ou lista de componentes) de um produto?**
 - § É o elemento de ligação entre diversas áreas da empresa;
 - § A partir dela é disparada a necessidade de compra ou fabricação dos SSCs (Sistemas, Sub-sistemas e Componentes);
 - § Os materiais nela utilizados, determinam o custo e por consequência influenciam no preço de venda.
- **Como a adequada elaboração da BOM pode ser afetada?**
 - § Pelas mudanças no projeto solicitadas pelos clientes após a conclusão ou início da fase de projeto detalhado;
 - § Pela utilização de componentes especiais, que tem por objetivo atender necessidades específicas dos clientes;
 - § Pela quebra da relação que existe entre os componentes de uma estrutura, quando da substituição de itens normais por especiais;
 - § Pelo volume de projetos e tempo disponível para análise do projeto e verificação da estrutura final do produto;
 - § Pela situação de *stress* mental a que o ser humano (projetista) está sujeito em momentos de pico (aumento expressivo do volume de atividades em um determinado momento do dia).
- **Quais as consequências de uma BOM gerada com erros?**
 - § Falta de material na linha de montagem;

- § Material comprado ou fabricado indevidamente, gerando sucata, refugo ou consumo desnecessário de matéria-prima;
- § Erros não detectados pela cadeia produtiva, linha de montagem ou controle de qualidade, podem chegar ao cliente. Um produto fora de sua especificação pode trazer conseqüência desastrosa aos clientes e fere a imagem da empresa.

Desta forma, o papel e contribuição de um sistema nesta tarefa é de:

- Auxiliar o projetista em sua atividade;
- Reduzir a falha humana;
- Registrar e disponibilizar o conhecimento de domínio dos especialistas;
- Prover dados e informações capazes de auxiliar os gerentes da área de projeto de produtos a identificar necessidades de treinamento e melhoria da qualidade dos dados e informações armazenadas no sistema.

O item 1.2.1 apresenta as razões que levaram a conclusão de que este sistema deveria ser criado com base em técnicas de sistemas especialistas.

1.2.1 Justificativa para utilizar a técnica de Sistemas Especialistas

Explicar a origem de erros de projeto exige conhecimento prático, também chamado de heurístico, e insere aspectos relacionados com especificação, seleção e produção do produto. Este conhecimento pode variar constantemente, seja por novas necessidades a serem atendidas seja por mudanças no processo de fabricação que interferem no projeto do produto.

Os dados de entradas para solução de problemas de projeto nem sempre são corretos e completos podendo-se perder informações desde a especificação do produto que provém do Departamento de Vendas a partir de seu contato com o cliente até chegar ao projetista.

A técnica de Sistemas Especialistas é caracterizada por não possuir um fim, ou seja, pode e recomenda-se que seja elaborado a partir de incrementos contínuos. Estes incrementos fornecem ao *software* novas capacidades e funcionalidades antes inexistentes.

Uma análise mais criteriosa da viabilidade de aplicar sistemas especialistas é apresentada no item 1.2.2, entretanto, sob os aspectos acima apresentados entende-se que a técnica de sistemas especialistas é perfeitamente aplicável, dado que, em sistemas baseados em algoritmos, seria necessário verificar 100% das possibilidades de erros, enquanto que com o uso das técnicas de sistemas especialistas, baseado no conhecimento heurístico, é possível buscar e identificar filtros para os problemas baseados em fatos que direcionam aos mais prováveis erros.

1.2.2 Viabilidade de aplicação de Sistemas Especialistas

A aplicabilidade de sistemas especialistas pode e deve ser questionada antes de se iniciar um desenvolvimento. Com objetivo de entender em quais condições esta aplicabilidade deve ser validada, Silva (1998) apresenta diversas considerações a respeito das possibilidades, justificativas e o apropriado desenvolvimento de um sistema especialista, para as quais buscou se as respostas considerando o protótipo ao longo de seu desenvolvido:

- Há especialistas confiáveis no domínio do conhecimento considerado?
Sim, há um especialista principal e outro substituto;
- Estes especialistas concordam com a escolha e precisão das soluções?
Concordam.
- Os especialistas são capazes de explicar os métodos aplicados para obter as soluções? Sim são capazes. Esta tarefa entretanto é mais difícil quando envolve experiência prática.
- A tarefa requer habilidade heurística? Sim, grande parte do conhecimento dos especialistas é devido a observações e retorno de informações e de sua experiência surge dos registros de não conformidade e no caso da verificação requer muita experiência prática para se chegar rapidamente aos possíveis erros.

Além destas perguntas, outras considerações importantes são analisadas:

- As tarefas não podem ser muito difíceis, de modo a permitir que o especialista ensine outra pessoa iniciante. Caso a tarefa seja muito difícil a ponto de exigir intenso processo heurístico, o conhecimento necessário para esta tarefa também é difícil de ser capturado e implementado em um

sistema especialista. Esta fase, devido ao fato da simplificação do processo interativo entre usuário e sistema, é absorvida pelo próprio sistema especialista, já que o usuário se limita a compreender as saídas geradas pelo sistema.

- As tarefas necessitam ser precisamente entendidas. Não devem requerer uma intensiva manipulação de conhecimento comum, ou seja, conhecimento genérico que geralmente toda pessoa possui. Essa condição exige certo conhecimento por parte do usuário pois diversos termos utilizados no *software* são comuns às pessoas deste universo. O início do *software* prevê observações do tipo: sistema especialista desenvolvido para utilização do departamento de projeto de motores industriais, por exemplo.

As condições para justificar a construção de um sistema especialista são:

- A solução deve ter alto retorno: o investimento em termos de tempo consumido nas etapas de aquisição do conhecimento e implementação no *software* é elevado, o que cria expectativas de benefícios proporcionados. Um fator retorno mensurável é o número de discordâncias verificadas com a utilização do *software*, o que corresponde a menos retrabalho na linha de produção ou até mesmo problemas de campo decorrentes da seleção incorreta de componentes;
- O conhecimento está em risco de ser perdido? Apesar de existirem vários especialistas prestes a se aposentar, este problema não é latente no cenário atual da empresa;
- Os especialistas estão se tornando raros em virtude de mudanças na organização ou outros fatores? Sim. O crescimento da empresa alvo na ordem de 20% ao ano faz com que pessoas sejam remanejadas para outras áreas ou para filiais da empresa em outros países;
- O conhecimento pode ser requisitado em diferentes locais ao mesmo tempo? Sim, principalmente porque se criam pessoas especializadas em determinado tipo de problema ou projeto cuja eventual falta no caso de uma reunião, férias ou outra ausência deixa o problema a cargo de outros projetistas menos habituados à situação;
- O conhecimento pode ser necessário em ambientes hostis ou de difícil acesso? Não.

- A tarefa deve ser feita através de manipulação simbólica? Problemas com solução algorítmica não são apropriados para sistemas especialistas. O propósito deste protótipo é identificar divergências ou inconsistências comparando as características e dimensões dos componentes especiais e verificar se os componentes corretos estão em uso conforme requisitos do cliente. A utilização de um componente especial no lugar de um padrão ou opcional pode incorrer na necessidade de alterar ou substituir outros componentes a ele relacionados.
- A tarefa deve exigir conhecimento de especialistas, sendo suficientemente difícil para requerer alguns anos de experiência no domínio considerado para ser considerado um especialista. Os responsáveis pela atividade à qual o sistema protótipo está relacionado são todos projetistas com mais de 10 anos de experiência na função.
- A tarefa deve se relacionar com um problema suficientemente restrito para ser gerenciado e suficientemente abrangente para ter interesse prático. As definições de gerenciamento e abrangência dependem do domínio do problema e são vitais para o desenvolvimento e progresso do sistema especialista. Outro ponto chave no desenvolvimento de um sistema especialista consiste nos objetivos pretendidos. O *software* deve privilegiar, uma abrangência específica e se aprofundar nesta decisão. Por exemplo, o *software* protótipo proposto se destina a utilização no setor de projeto de motores industriais, de baixa tensão e corrente alternada. Motores residenciais e utilização não industrial não foram considerados neste estudo.

Silva (1998) explica que as considerações envolvidas nestas condições não são sempre explícitas antes do desenvolvimento. Assim para minimizar as incertezas relacionadas ao processo de interação com especialistas, foi justificável aplicar a abordagem incremental. Esta abordagem determina que o próprio sistema especialista pode ajudar em seu desenvolvimento.

1.2.3 Ferramenta utilizada no desenvolvimento do sistema

A seleção de uma ferramenta para desenvolvimento de sistemas especialistas, requer que sejam considerados além de fatores como: tempo, recursos financeiros e de pessoal, principalmente a capacidade de manipular conhecimento de natureza heurística. Pode ser utilizar linguagens de programação tradicionais (LISP, PROLOG, C++) ou sistemas de engenharia de conhecimento (*SHELL*). Linguagens de programação oferecem maior flexibilidade, mas geralmente requerem da equipe de desenvolvimento a implementação da máquina de inferência para acessar a base de conhecimento. Os sistemas *SHELL*, apesar de oferecerem menor flexibilidade, fornecem mais orientações e mecanismos para representação e acesso ao conhecimento. O desenvolvimento deve ser mais fácil, rápido e barato com este tipo de sistema.

Existem várias ferramentas *SHELL* disponíveis no mercado, dentre as quais se destacam o JESS e o Clips. Estas ferramentas permitem representar o conhecimento através de três formas diferentes as quais são a seguir descritas:

- Regras: usadas para representar conhecimento heurístico baseado em experiência de especialistas humanos;
- Funções Genéricas: usadas para representar conhecimento do tipo procedural;
- Orientação a Objeto: usada para dar ao sistema maior flexibilidade e capacidade de expansão. Este tipo de programação permite a utilização de cinco formas gerais, a saber: classes, manipuladores de mensagens, abstração, encapsulamento, herança e polimorfismo. Regras podem condicionar disparos em objetos e fatos.

Com base nas necessidades, limitações e restrições de tempo e conhecimento, o CLIPS foi utilizado no desenvolvimento do protótipo. Um ponto decisivo considerado na seleção da ferramenta foi o fato do engenheiro do conhecimento ter tido contato e treinamento com o CLIPS durante a disciplina de Sistemas Especialistas a qual fez parte da grade de disciplinas do mestrado ao qual o presente trabalho está relacionado.

1.3 Objetivos do Trabalho

1.3.1 Objetivo Geral

Sistematizar e disponibilizar com o desenvolvimento incremental de um protótipo de Sistema Especialista o conhecimento dos profissionais da área de detalhamento de produto da empresa alvo.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são a seguir apresentados:

- Demonstrar a viabilidade de utilização de um sistema especialista capaz de reproduzir de forma similar o resultado que seria gerado pelo projetista em sua tarefa de verificação dos materiais (componentes) utilizados na estruturação do produto;
- Descrever o processo atual no qual será testado o sistema especialista;
- Realizar um estudo de viabilidade de implantação do um sistema especialista;
- Focalizar a construção do protótipo em linha de produtos restrita, porém representativa;
- Prever a ampliação do protótipo para outros produtos da empresa;
- Registrar as dificuldades encontradas pelo engenheiro de conhecimento.

1.4 Resultados Esperados

Criar na área onde se irá testar o sistema especialista, um senso comum da importância de se registrar o conhecimento.

Despertar para a aplicabilidade de sistemas especialistas como forma de auxiliar as atividades do dia a dia e demonstrar com o uso da ferramenta a possibilidade de obter ganhos também em nível gerencial.

Conforme será visto nos próximos capítulos, muitos dos problemas podem ter sua origem na qualidade dos dados dos sistemas utilizados pelo projetista. Desta informação surgiu outro potencial benefício e portanto uma informação de saída a ser tratada pelo protótipo, ou seja, identificar problemas de cadastramento no banco de dados da empresa.

Esta informação servirá de apoio aos gestores para tomada de ações no sentido de melhorar a qualidade das informações críticas para o sistema. Para gerar esta informação, uma das saídas propostas para o protótipo é:

- Registrar as ocorrências para os erros identificados;
- Registrar os usuários do sistema e a frequência de utilização do protótipo.

1.5 Estrutura do Trabalho

Apresenta-se neste trabalho os resultados obtidos no desenvolvimento incremental de um sistema especialista protótipo, o qual tem por objetivo ser utilizado como ferramenta auxiliar na tarefa de verificação da estrutura de produto de um motor elétrico. Este domínio de conhecimento está diretamente ligado à principal atividade do autor.

Neste capítulo descreveu-se sucintamente o cenário atual de um setor de projeto do produto de motores elétricos, com uma rápida visão sobre sistemas especialistas, a justificativa do trabalho e empregabilidade de técnicas de sistemas especialistas, os objetivos e resultados esperados.

O Capítulo 2 analisa o processo de projeto e os conceitos relacionados ao PDP (Processo de Desenvolvimento de Produtos), o qual neste trabalho está relacionado ao projeto de motores elétricos industriais de corrente alternada e baixa tensão. Os conceitos relacionados a projeto de motores elétricos serão apresentados, juntamente com detalhes construtivos, desenhos e figuras a fim de inserir o leitor neste universo. Este capítulo também entra em detalhes da atividade de verificação

de projeto com foco na estrutura de produto que é o principal objeto relacionado ao estudo, mostrando as conseqüências da manipulação de dados deste objeto.

O Capítulo 3 aborda conceitos relacionados à inteligência artificial e sistemas especialistas que serviram de base para decisão de utilizar sistemas especialistas, além do modelo de desenvolvimento adotado neste trabalho com detalhes da fase de aquisição do conhecimento.

No Capítulo 4 apresentam-se os detalhes do desenvolvimento do protótipo, a etapa de representação do conhecimento e uma discussão e proposta alternativa ao processo convencional de entrada de dados utilizada em sistemas especialistas. A interface de saída, além do processo de verificação e validação do protótipo são também apresentados neste capítulo.

No capítulo final são apresentadas contribuições, recomendações para trabalhos futuros e as conclusões finais.

CAPÍTULO II

PROCESSO DE PROJETO DE MOTORES ELÉTRICOS

Este capítulo apresenta uma visão geral do produto motor elétrico com detalhes específicos que influenciam em sua forma e concepção final. Esta visão objetiva familiarizar o leitor com os termos técnicos utilizados e com a infinidade de variáveis manipuladas pelo projetista, principalmente no que se relaciona a elaboração da estrutura de produto (BOM), que em inglês significa *BILL OF MATERIAL*, ou seja, lista de materiais que compõe a estrutura de produto.

O processo de gestão na empresa-alvo é auxiliado por sistemas de informação. Estes sistemas são utilizados nas principais fases propostas para um processo de desenvolvimento de produtos e armazenam informações que são utilizadas pelo protótipo desenvolvido. Dentre estas informações a estrutura do produto é a principal fonte, cujos conceitos e utilização são analisados em detalhes neste capítulo.

O capítulo apresenta ainda conceitos envolvendo o processo de gestão de desenvolvimento de produtos e a classificação de projetos segundo seu grau de inovação. Pretende-se mostrar a relação entre as fases propostas e sua aplicação no cenário de projeto encontrado na empresa-alvo.

Detalhes do cenário de projeto no qual está inserido o protótipo, além de exemplos práticos de possíveis problemas encontrados na lista de componentes de uma estrutura de produto e resultado do processo de projeto, são também apresentados.

2.1 Uma visão geral dos motores de indução trifásicos

O motor de indução trifásico foi inventado em 1899 pelo russo Michael von Dolivo Dobrovolski, engenheiro que trabalhava na empresa AEG na Alemanha, cuja

concepção prevalece até hoje. Pouco tempo após o invento de Dobrovolski, teve início a produção seriada de motores elétricos de indução trifásicos.

Estes motores, fabricados desde pequenas potências até milhares de kW, correspondem a um segmento de mercado no qual a empresa alvo é hoje líder nacional, maior da América latina e uma das maiores do mundo. São motores usualmente utilizados no acionamento de bombas, exaustores, ventiladores, compressores, sistemas de refrigeração, máquinas-ferramenta, entre outros.

Apresentado na Figura 2.1, a linha Well é um exemplo de motor de indução trifásico com características definidas para atender um segmento específico de mercado.



Figura 2.1 - Motor Elétrico de indução trifásico – Linha Well. Adaptado do Catálogo Geral de Motores Elétricos WEG (2006).

Motores considerados de aplicação residencial (Figura 2.2), com potência de até aproximadamente 1,5kW (2cv), tipicamente encontrados em eletrodomésticos e bombas de água residenciais, não farão parte deste trabalho, pois se trata de um produto desenvolvido por outro departamento da empresa alvo. A ampliação dos recursos do sistema especialista tornando seu uso possível também nesta gama de produtos é perfeitamente possível, desde que seja de interesse do departamento e graças a metodologia de desenvolvimento incremental aplicada no desenvolvimento do protótipo.

Motor monofásico Jet Pump com capacitor de Partida

Motores monofásicos NEMA 48 e 56



Figura 2.2 – Motor Elétrico de indução monofásico. Adaptado do Catálogo Geral de Motores Elétricos WEG (2006).

Do universo tecnológico apresentado na Figura 2.3, os motores que possuem custo mais elevado são os de corrente contínua. Estes motores precisam de uma fonte de corrente contínua ou dispositivo que transforme a corrente alternada em contínua, podem funcionar com velocidade ajustável e são utilizados em aplicações que necessitam de grande flexibilidade e controle preciso de velocidade. Por isso seu uso é restrito a casos específicos nos quais as exigências compensam o custo mais elevado do equipamento e da instalação elétrica.

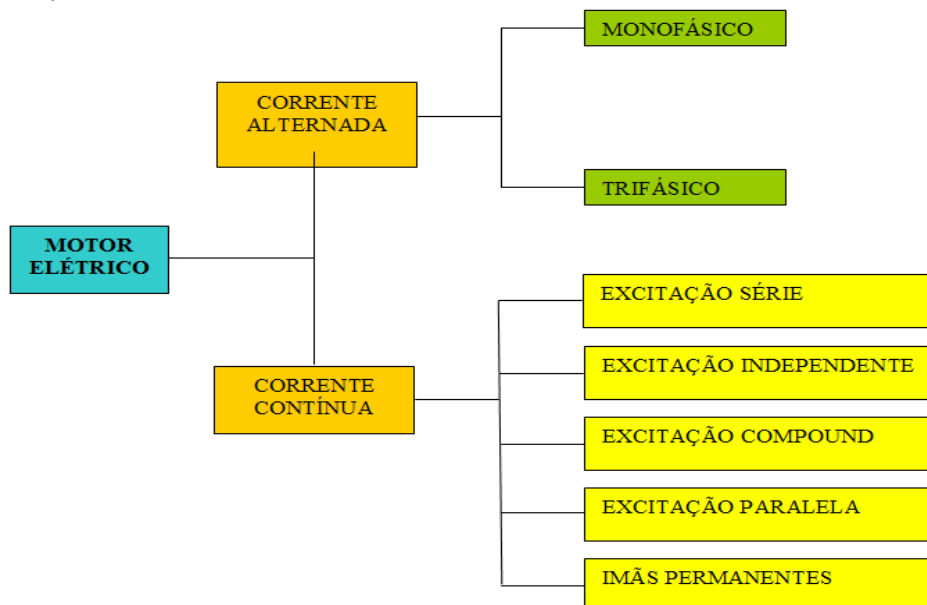


Figura 2.3 - Universo tecnológico de motores elétricos. Adaptado do Catálogo Geral de Motores Elétricos WEG (2006).

Os motores de corrente alternada são os mais utilizados pois a energia elétrica é transmitida normalmente desta forma. Tais motores podem funcionar com velocidade fixa (síncrono) ou variável (assíncrono), sendo o primeiro utilizado em grandes potências ou em casos onde se deseja velocidade invariável. O motor de indução é um motor assíncrono, que geralmente opera sob velocidade constante, porém ligeiramente alterada em função da carga mecânica aplicada ao eixo. Atualmente é possível controlar a velocidade dos motores de indução com a utilização de inversores de frequência.

Diversas instituições de diferentes países regem as Normas estabelecidas e seguidas no projeto e fabricação de motores de indução trifásicos assíncronos. A normalização visa garantir uma padronização mínima a ser respeitada pelos inúmeros fabricantes. Entre estas instituições merecem destaque:

- ABNT: *Associação Brasileira de Normas Técnicas*;
- IEC: *International Electrotechnical Commission*;
- NEMA: *National Electrical Manufacturers Association*;
- DIN: *Deutsches Institut für Normung*.

Os fabricantes, seguindo a normalização, costumam dividir os motores em grandes famílias, com características distintas uma das outras. Uma das grandes famílias é a dos motores totalmente fechados com ventilação externa (TFVE). Esse tipo de refrigeração exige carcaça fechada com aletas. No caso brasileiro, os projetos atendem as normas NBR 7094, NBR 5432, NBR 5383 e NBR 6164, entre outras.

No departamento de Engenharia do Produto da empresa alvo são projetados motores que acionam cargas industriais ou similares de até 370kW(500cv) de potência alimentados em baixa tensão (220V). Os projetistas do departamento estão organizados em grupos relacionados ao tamanho da carcaça do motor e cuja definição é apresentada no item 2.2.

O presente trabalho, em função dos projetistas envolvidos, se concentra nos motores de indução trifásicos de corrente alternada projetados nas carcaças que abrangem a faixa de até 37kW (50cv).

2.2 Detalhes construtivos de Motores Elétricos de Indução Trifásicos

No capítulo 3 são apresentados conceitos relacionados a sistemas especialistas, nos quais a utilização de regras faz parte do seu desenvolvimento. No sistema protótipo desenvolvido implementou-se uma série de regras, envolvendo componentes utilizados no projeto de motores elétricos de indução trifásicos, em sua maioria relacionados a motores TFVE. Este item pretende apresentar detalhes construtivos importantes para a compreensão das regras implementadas e apresentadas nos capítulos seguintes, bem como, a possibilidade do uso de sistemas especialistas com objetivo de evitar riscos e conseqüências indesejáveis pelo uso de componentes inadequados e que não atendem aos requisitos de projeto.

Motores totalmente fechados normalmente apresentam sua carcaça construída em ferro fundido, podendo também ser de alumínio injetado. Tais motores geralmente apresentam uma caixa de ligação, ou seja, uma caixa onde é realizada a conexão da rede elétrica com os terminais do motor. Os motores podem ser produzidos com tampa flangeada no lugar da tampa frontal (dianteira), exemplo da Figura 2.4, com objetivo de oferecer mais alternativas de montagens e fixação.

A Figura 2.4 mostra um motor TFVE em vista explodida com a identificação de seus principais componentes.

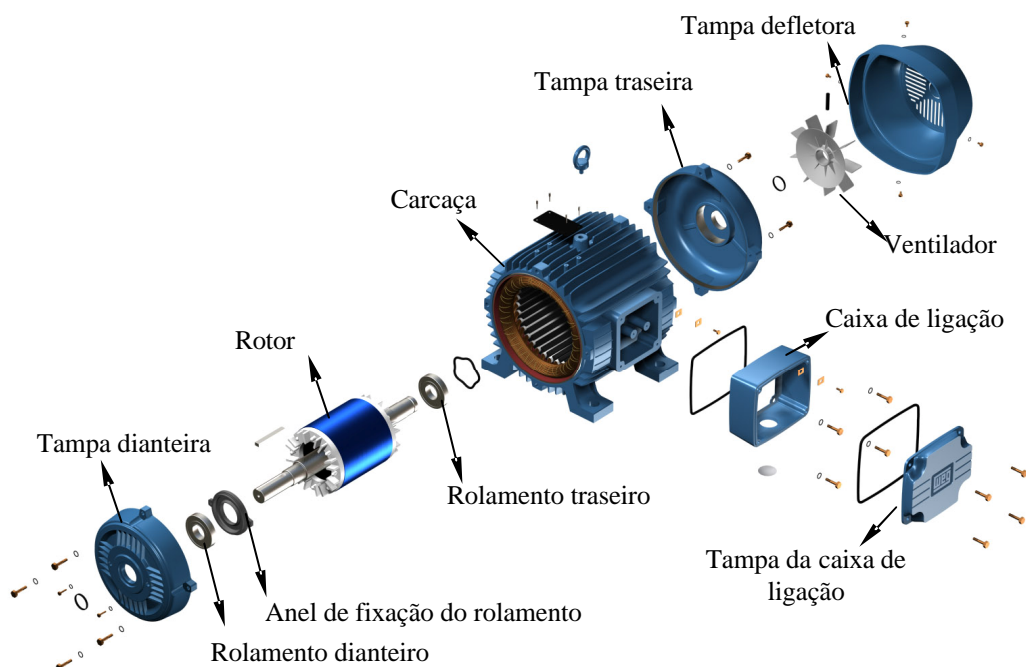


Figura 2.4: Vista explodida de um motor elétrico com carcaça totalmente fechada. Adaptado do Catálogo Geral de Motores Elétricos WEG (2006).

Derivado dos motores do tipo normal (de uso geral), existe ainda o motor chamado à prova de explosão ou para áreas de risco. Essa classificação, apresentada na Tabela 2.1, é definida por entidades regulamentadoras, neste caso são ABNT e IEC, em forma de normas (NBR/IEC). Esses motores são aptos para serem aplicados em ambientes com atmosfera potencialmente explosiva, com gases inflamáveis onde uma faísca pode causar uma explosão. São também motores TFVE porém a carcaça, as tampas e a caixa de ligação são reforçadas, atendendo a requisitos de projeto que devem evitar qualquer possibilidade de passagem de chama para o ambiente externo ao motor, complementado pelo controle de produção que segue um padrão rígido devido a sua responsabilidade.

Tabela 2.1 – Tipos de proteção em equipamentos para áreas de risco. Adaptado do Catálogo Geral de Motores Elétricos WEG (2006).

Tipo de Proteção	Simbologia IEC/ABNT	Definição
À prova de explosão	Ex(d)	Capaz de suportar explosão interna sem permitir que se propague para o meio externo
Segurança aumentada	Ex(e)	Medidas construtivas adicionais aplicadas a equipamentos que em condições normais de operação produzem arco, centelha ou alta temperatura.
Não acendível	Ex(n)	Dispositivo ou circuitos que apenas em condições normais de operação, não possuem energia suficiente para inflamar a atmosfera explosiva

A utilização incorreta de componentes em motores próprios para este tipo de ambiente representa alto risco, pois poderia representar um desastre para o cliente e para empresa, em ocorrendo um eventual acidente. A aplicação de Sistemas especialistas, com regras semelhantes às implementadas neste projeto, pode auxiliar na prevenção de acidentes pelo uso incorreto de componentes que poderiam comprometer a segurança e confiabilidade do produto.

A carcaça é o conjunto que suporta o rotor e o estator, além de garantir o invólucro do conjunto. Além de carcaças totalmente fechadas, existem carcaças abertas. Quando totalmente fechadas, as carcaças possuem aletas para proporcionar melhor troca de calor gerado pelo motor com o ambiente. A carcaça é

fechada pelas tampas dianteira e traseira mostradas na Figura 2.4. Nas tampas são alojados os rolamentos e as vedações. Estes componentes são alguns dos principais envolvidos nas regras implementadas no protótipo SEVME (Sistema Especialista Verificador de Motores Elétricos).

Conforme exemplo da Figura 2.5, as carcaças de motores abertos podem ser construídas em ferro fundido, alumínio ou chapas soldadas. As tampas dianteiras e traseiras têm as mesmas funções que no caso do motor com carcaça fechada.



Figura 2.5 - Motor com carcaça aberta. Adaptado do Catálogo Geral de Motores Elétricos WEG (2006).

Carcaças totalmente fechadas são padronizadas pela NBR 5432. A padronização da nomenclatura do motor é feita a partir da medição da altura (H) do plano da base do motor ao centro da ponta de eixo, em milímetros, conforme Figura 2.6. Assim, um motor modelo 200 possui 200 milímetros de distância entre o centro da ponta de eixo e o plano da base do motor.

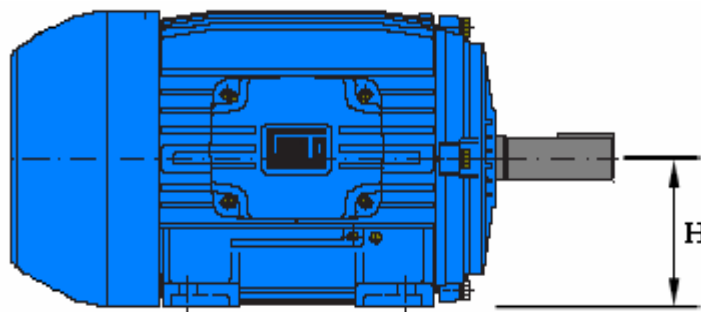


Figura 2.6 - Nomenclatura do motor a partir da medição da altura H. Adaptado do Catálogo Geral de Motores Elétricos WEG (2006).

A carcaça também faz o papel de invólucro de proteção do motor. A exigência do índice de proteção (IP) depende do ambiente no qual o motor será instalado. A norma NBR 9884 define os graus de proteção para equipamentos elétricos por meio

das letras características “IP” seguidas de 2 algarismos. Um motor instalado ao tempo, sujeito a intempéries exige um índice de proteção superior ao de um motor instalado em uma sala limpa e seca.

A Tabela 2.2 apresenta exemplos dos principais graus de proteção definidos para motores elétricos com invólucros abertos e fechados. Quanto maior o valor dos algarismos do índice (grau) de proteção, maior será a segurança suportada.

Tabela 2.2 – Exemplos de graus de proteção. Adaptado do Catálogo Geral de Motores Elétricos WEG (2006).

Motor	Grau de proteção	1º. Algarismo		2º. Algarismo
		Proteção contra contato	Proteção contra corpos estranhos	
Aberto	IP 21	Toque com os dedos	Corpos estranhos sólidos de dimensões acima de 12mm	Pingos de água na vertical
	IP 23			Água de chuva até uma inclinação de 60° com a vertical
Fechado	IP 54	Proteção completa contra toques	Proteção contra acúmulo de poeiras nocivas	Respingos de todas as direções
	IP55			Jatos de água em todas as direções
	IP(W)55			Chuva e maresia

Com relação à tabela acima, o primeiro algarismo do grau de proteção pode variar de 0 a 6, indicando o grau de proteção contra a penetração de corpos sólidos estranhos e contato acidental. Já o segundo algarismo indica o grau de proteção contra penetração de água no interior de um equipamento elétrico e pode variar de 0 a 8. Nas tabelas A1.1 e A1.2 do Apêndice 1 encontra-se o significado dos valores para o primeiro e segundo algarismos respectivamente.

O atendimento aos requisitos de projeto, como por exemplo suportar ambientes considerados agressivos sujeitos à presença de pó, poeira, fibras, particulados e jatos de água, entre outros, está diretamente relacionado aos componentes utilizados no motor. Verificar se os componentes selecionados atendem ao grau de proteção determinado para o projeto não está diretamente relacionado ao escopo deste trabalho, porém ao selecionar um componente considerado adequado, o projetista acaba modificando a estrutura do produto. Esta modificação é que interessa ao trabalho.

Através do exemplo de sistema de vedação apresentado na Figura 2.7, pode-se perceber que existe uma relação entre o componente de vedação, o eixo e a tampa. Percebe-se dessa relação, que as definições feitas para um sistema ou componentes, tem como impacto a provável adequação de outros materiais da estrutura do produto.

O Departamento de Engenharia de Produtos da empresa alvo trabalha na criação de componentes, desenhos, lista de peças e especificações de montagem para a linha completa de motores trifásicos industriais de corrente alternada e baixa tensão dos modelo 63, 71, 80, 90, 112, 132, 160, 180, 200, 225, 250, 280, 315 e 355 definidos pela norma IEC e dos modelos correspondentes definidos pela norma NEMA.

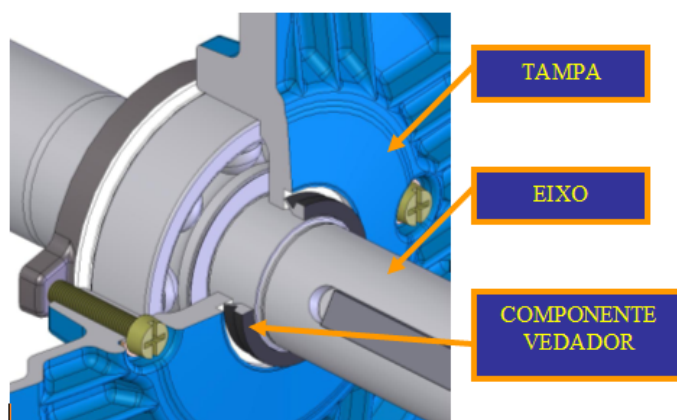


Figura 2.7 - Sistema de vedação de motor elétrico. Adaptado do Catálogo Geral de Motores Elétricos WEG (2006).

Dentro de cada modelo de uma determinada linha pode-se ter componentes especiais, por exemplo, tampas com retentor, tampas com pino graxeiro para lubrificação do rolamento, eixos com projeto para rolamentos ou acoplamentos especiais, entre outros, onde a possibilidade de combinação de componentes é enorme. A alteração de apenas uma característica na especificação padrão do produto e não disponível como um opcional da linha, é entendida como uma especialidade, exigindo a utilização de um novo componente diferente do utilizado no motor padrão. Nesse universo, devido às diversas combinações de componentes possíveis nos projetos dos motores elétricos, conta-se na empresa alvo com mais de 100.000 projetos de motores elétricos já desenvolvidos e resultantes de variações criadas para satisfazer requisitos de clientes.

2.3 Cenário de projeto e a atividade de verificação da estrutura

Neste item descrevem-se detalhes pertinentes ao cenário no qual está inserido o projetista, o qual será usuário do sistema especialista protótipo objeto deste trabalho. Conforme já citado no capítulo inicial, o projetista inicia seu trabalho de verificação pela análise do projeto especial com base no desenho criado pelo Departamento de Vendas. Ratifica-se que qualquer alteração em relação ao produto padrão, não disponível como um opcional da linha, deve ser submetida ao departamento de Engenharia do Produto.

A figura 2.8 apresenta de forma macro a atividade de verificação da lista de materiais (componentes) do produto inserida no fluxo do processo de projeto.

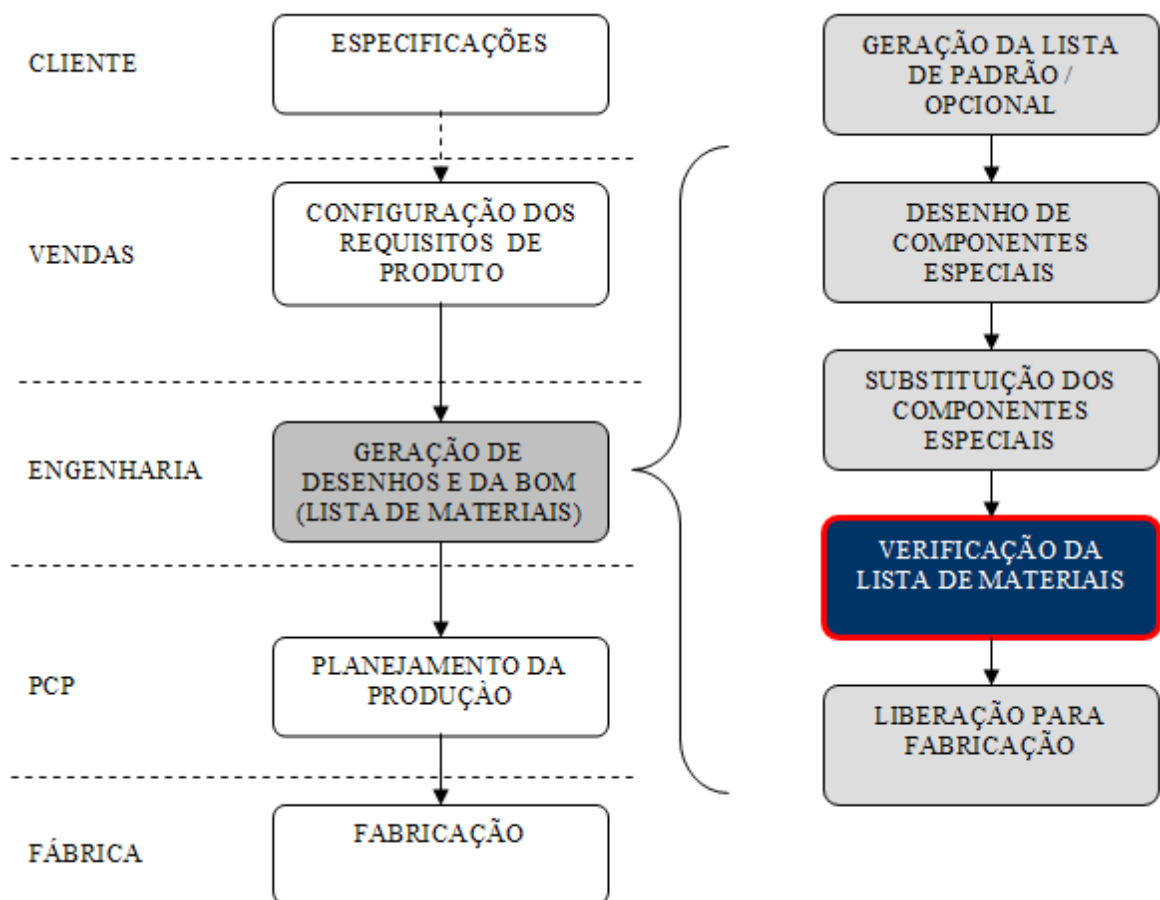


Figura 2.8 - Atividade de verificação no processo de projeto.

A partir das necessidades inicia-se o projeto detalhado o qual conforme Figura 2.8 tem como sua última atividade, anterior à liberação para produção, a atividade

de verificação da lista de materiais do projeto. É nesta etapa que o sistema protótipo desenvolvido entra em cena, verificando e confrontando características de componentes especiais da estrutura do produto e registrando em mensagens explicativas os erros detectados.

No departamento de engenharia do produto da empresa alvo há 3 equipes de projetos divididas em função dos modelos e dimensões dos motores. Cada equipe é composta por um projetista e um especialista responsável por revisar os projetos executados. Para estas 3 equipes há um outro especialista, responsável por uma última revisão. Portanto, um projeto é submetido a 3 avaliações, a primeira executada pelo próprio projetista, a segunda pelo responsável de cada equipe e a terceira revisão executada pelo verificador geral.

A elaboração da estrutura de produto ocorre na empresa alvo durante o processo de detalhamento do projeto. Neste processo têm-se duas funções-chaves, uma desempenhada pelo projetista, responsável por criar (projetar e desenhar) os conjuntos e componentes necessários para formar a estrutura do produto. A outra função é desempenhada pelo verificador do projeto, responsável por assegurar que os requisitos, dos componentes especiais e do projeto como um todo, foram corretamente considerados pelo projetista. Tem-se portanto dois usuários envolvidos no processo, cada qual com papel bem definido para com o sistema especialista desenvolvido e cujas funções são detalhadas no capítulo 3.

Neste processo de detalhamento de projetos especiais, diversos componentes e soluções já existem e estão implantados nos sistemas de informação utilizados pelos projetistas. O detalhamento e revisão dos componentes selecionados e projetados cabem inicialmente ao projetista sendo posteriormente revisado pelo verificador e eventualmente por mais um especialista.

Mesmo com tanto cuidado, diversos erros se perpetuam, especialmente pela incapacidade do ser humano manter a concentração e atenção a um número tão grande de detalhes. Considerando o universo de 1200 projetos especiais detalhados por mês, oriundos de diversas modificações solicitadas pelos clientes, sendo analisados por apenas 3 equipes formadas por 1 projetista em 22 dias trabalhados resulta em cerca de 18 projetos por projetista ao dia. Agravando este fato, há o chamado “dia do fechamento”, ou seja, a data limite para que os projetos sejam enviados para os departamentos produtivos, o que provoca certa agitação no setor. O projetista além da atividade de projeto é responsável por corrigir os erros

encontrados durante o processo produtivo e que não foram detectados na atividade de verificação do projeto. O verificador de projeto além de sua função principal também responde dúvidas que podem surgir no processo produtivo ou mesmo de vendedores. Toda esta preocupação demonstra a importância e qualidade exigida para estrutura do produto, o que deu credibilidade para o desenvolvimento do sistema.

2.4 O processo de desenvolvimento de produtos na empresa alvo

Neste item do capítulo faz-se uma análise entre o modelo de gestão de desenvolvimento de produtos proposto por Rozenfeld et al. (2006) e sua relação com o processo aplicado nos produtos desenvolvidos, em um departamento e seção de projeto específicos, na empresa alvo.

O desenvolvimento de produtos consiste em um conjunto de atividades por meio das quais busca-se, a partir de necessidades do mercado e das possibilidades e restrições tecnológicas, e considerando as estratégias competitivas e de produto da empresa, chegar às especificações de projeto de um produto e de seu processo de produção (ROZENFELD et al., 2006).

Projeto do produto é um plano de empreendimento a ser realizado, com objetivo de atender uma necessidade, um produto. Pode ser formulado como uma atividade de planejar uma peça, parte ou sistema, sujeito às restrições da resolução, de forma a atender de maneira ótima as necessidades estabelecidas. As restrições estão relacionadas ao conhecimento disponível, tempo, custos, materiais, equipamentos de fabricação, uso, manutenção e descarte.

Norton (2004) define projeto de engenharia como “o processo de aplicação das várias técnicas e princípios científicos com o intuito de definir um dispositivo, um método ou um sistema suficientemente pormenorizado para permitir sua realização”. Assim, o projeto de engenharia pode ser aplicado para diversas áreas do conhecimento. Está-se interessado particularmente no projeto do produto, uma máquina, no caso em questão, um motor elétrico. Norton (2004) define que “máquina é um aparato que consiste em unidades inter-relacionadas ou dispositivo que modifica a força ou o movimento”. O motor elétrico se encaixa adequadamente nas

duas definições, pois possui diversas unidades inter-relacionadas, seus componentes, e modifica força ou movimento ao transformar energia da forma elétrica para a forma mecânica.

Rozenfeld et al. (2006) Figura 2.9 apresentam, com foco na gestão, uma visão geral sobre o processo de desenvolvimento de produtos segundo o modelo unificado apresentado em seu livro “Gestão de Desenvolvimento de Produtos”.

O modelo unificado originou-se da união das metodologias, estudos de caso, modelos, experiências e melhores práticas desenvolvidas e coletadas nos últimos anos pelas equipes de pesquisadores coordenadas pelos autores.

A modelagem de processos é uma área do conhecimento que estuda os métodos e as ferramentas necessárias para descrever os processos de negócio das empresas. O resultado final é um modelo, isto é, um mapa ou representação, que descreve como é o processo de negócio. No caso do livro “Gestão de Desenvolvimento de Produtos”, é abordado exclusivamente o processo (de negócio) de desenvolvimento de produtos (PDP).

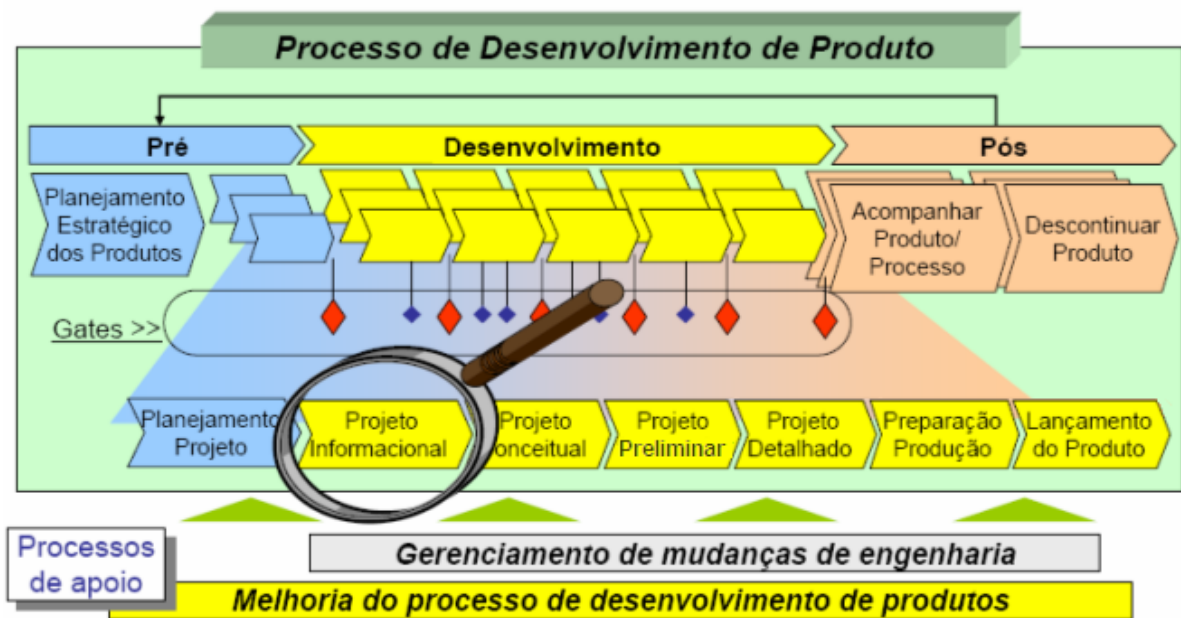


Figura 2.9 - Fases do processo de desenvolvimento do produto. Adaptado de ROZENFELD et al. (2006).

Romano (2003) apresenta, em sua tese de doutorado, um “Modelo de Referência para o Processo de Desenvolvimento de Máquinas Agrícolas”, no qual cada uma das macro-fases e fases é explorada em detalhes e que teve sua origem nas mesmas referências utilizadas por Rozenfeld et al. (2006).

Segundo o modelo apresentado na Figura 2.9, o processo de desenvolvimento de produtos divide-se em três macrofases: pré-desenvolvimento, desenvolvimento e pós-desenvolvimento. As macrofases de pré- e pós-desenvolvimento são mais genéricas, e podem ser, com pequenas alterações, utilizadas em outras empresas que não as de manufatura e bens de consumo duráveis e de capital, como é o caso de uma empresa fabricante de motores elétricos.

Para este trabalho tem-se interesse específico na macrofase desenvolvimento, a qual será analisada com objetivo de identificar em qual fase do processo de desenvolvimento será aplicado o sistema especialista. Os principais resultados desta fase, segundo Rozenfeld et al. (2006), são mostrados na Figura 2.10.

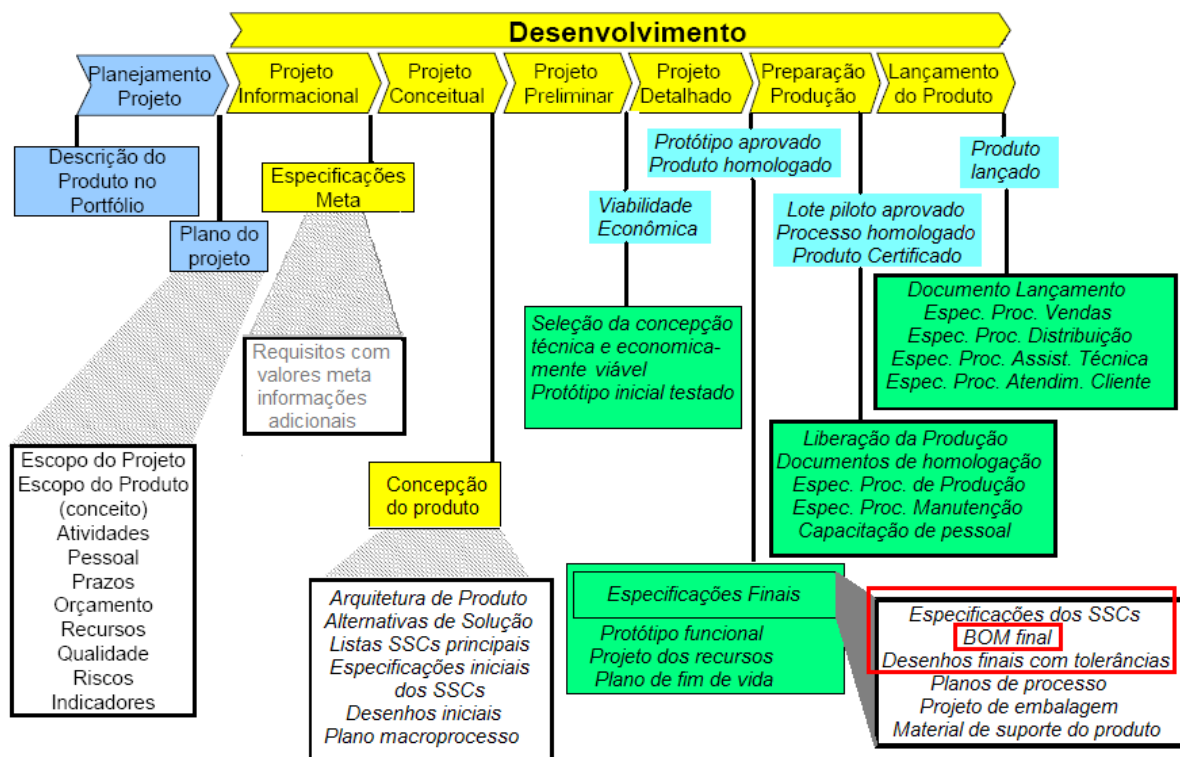


Figura 2.10 - Principais resultados das fases segundo o Modelo Unificado do Processo de Desenvolvimento do Produto. Adaptado de ROZENFELD et al. (2006).

A macrofase de desenvolvimento está dividida nas fases de: projeto informacional, projeto conceitual, projeto preliminar, projeto detalhado, preparação da produção e lançamento do produto, cujos conceitos principais pesquisados em Rozenfeld et al. (2006) são apresentados no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Fases da macrofase de desenvolvimento.

Fase de Projeto Informacional: O projeto informacional corresponde ao início da fase de desenvolvimento, na qual identifica-se as necessidades dos clientes e as transforma em um conjunto de objetivos ou metas que o produto deve atender.

Fase de Projeto Conceitual: O projeto conceitual gera a concepção do produto de modo a atender da melhor maneira possível as necessidades identificadas na fase informacional, sujeita a limitações de recursos e restrições do projeto. O modelo de produto obtido ao final desta fase é a concepção do produto.

Fase de Projeto Preliminar: Esta fase ocorre entre o projeto conceitual e o detalhado. Segundo Pahl & Beitz (1996) apud Rozenfeld et al. (2006), é nesta fase que o projeto é desenvolvido, de acordo com critérios técnicos e econômicos e à luz de informações adicionais, até que a fase de projeto detalhado subsequente possa conduzir diretamente à produção. Nesta fase são testados os primeiros protótipos da concepção selecionada.

Fase de Projeto Detalhado: Esta fase tem como atividade central a criação e detalhamento dos SSCs, da documentação e especificações finais do produto, as quais são compostas pela especificação dos SSCs, desenhos finais com tolerâncias, planos de processo, projeto de embalagem, material de suporte e a estrutura de produto (BOM final), conforme ilustrado na Figura 210.

Um importante método para uso na fase conceitual é a busca de princípios de solução partindo da análise das funções e subfunções dos produtos e sistemas gerando-se uma estrutura funcional. Para cada função desta estrutura são atribuídos um ou mais princípios de solução. Este processo de definição de funções e princípios de solução é executado desde o produto e se desdobra em seus sistemas, subsistemas e componentes (SSCs) (ROZENFELD et al., 2006).

Projeto preliminar, esta fase parte das alternativas de solução propostas na fase conceitual chegando até o ponto em que uma decisão possa ser tomada e uma das soluções selecionada com base em critérios técnicos e economicamente viáveis.

Na empresa alvo, por exemplo, a fase preliminar é executada e faz parte do desenvolvimento toda vez que uma nova linha de produtos é criada ou passa por um processo de mudança de plataforma. Nesta fase, na empresa alvo, ocorre a fabricação de protótipos e de um ou mais lotes pilotos antes de confirmar o início da produção em lotes diários ou repetitivos do produto.

Já no caso dos projetos nos quais trabalha a equipe envolvida no desenvolvimento do sistema especialista protótipo, os projetos podem ser classificados como derivativos (ver item 2.4.1). São tipicamente projetos que não

requerem alto grau de inovação, basicamente utilizam componentes existentes com pequenas adequações dimensionais de acordo com necessidades específicas de clientes.

2.4.1 Classificação dos projetos quanto à inovação tecnológica

Projetos de desenvolvimento de produtos podem ser classificados por diversos critérios, sendo a mais comum e útil baseada no grau de mudanças em relação a projetos anteriores. Este subitem do capítulo tem por objetivos apresentar as classificações dos tipos de projeto quanto ao seu grau de inovação tecnológica e analisar sua adequação ao modelo unificado de PDP, com relação às fases propostas na macro-fase de desenvolvimento apresentadas por Rozenfeld et al. (2006).

Os projetos radicais envolvem significativas modificações no projeto ou processo, na empresa alvo ocorrem geralmente com grande participação do departamento de P&D (Pesquisa e Desenvolvimento). Nestes casos o modelo unificado de PDP deve ser aplicado na plenitude (ROZENFELD et al., 2006). Em projetos plataforma, o produto não é totalmente novo para a empresa, mas terá mudanças significativas na concepção. Nesse caso, o modelo de processo de desenvolvimento pode também ser aplicado na íntegra (ROZENFELD et al., 2006). Em Projetos incrementais os *produtos são derivados*, híbridos ou com *pequenas modificações* em relação aos já existentes. Segundo Rozenfeld et al. (2006), as fases e atividades iniciais da macrofase de desenvolvimento, no caso o plano de projeto, projeto informacional e conceitual, podem nesta classificação de projeto ser simplificada, pois a concepção do produto não terá modificações profundas. Nos projetos *follow-source* as fases iniciais e de projeto conceitual do produto são em geral eliminadas, pois o objetivo é adequar o processo produtivo a um projeto existente definido pela matriz da empresa, tornando-se neste caso pouco relevantes para as características deste tipo de projeto (ROZENFELD et al., 2006).

Segundo Rozenfeld et al. (2006), em termos objetivos, a determinação do grau de novidade de um produto pode ser avaliado pela porcentagem de itens ou partes na BOM desse produto que não foram utilizados antes em outro produto da empresa. Sob esta avaliação e com o conhecimento de que os projetos, executados no departamento e seção da empresa alvo, envolvidos no desenvolvimento do

sistema especialista protótipo são de produtos adicionais a uma linha, conclui-se que os projetos envolvidos são classificados como incrementais ou derivados.

2.4.2 Sistemas de Informação envolvidos nas fases do processo de projeto

Sistemas de Informação são sistemas que permitem a coleta, o armazenamento, o processamento, a recuperação e a disseminação de informações. Esses sistemas são hoje, quase sem exceção, baseados em computador e apóiam as funções operacionais, gerenciais e de tomada de decisão existentes na organização (BARELLA, 2000).

A Figura 2.11 apresenta os principais sistemas de informação envolvidos no processo de desenvolvimento do produto da empresa alvo. O fluxo inicia e termina com o cliente e o primeiro sistema acessado é o CRM seguido por outros sistemas, incluindo o sistema especialista desenvolvido. As siglas dos sistemas são a seguir apresentadas:

- CRM - **C**ustomer **R**elationship **M**anagment;
- SME - **S**istema gerador de desenhos de conjunto de aprovação de **M**otores **E**létricos;
- PDM - **P**roduct **D**ata **M**anagment;
- ERP - **E**nterprise **R**esource **P**lanning ;
- SEVME - **S**istema **E**specialista **V**erificador de **M**otores **E**létricos.

Considerando os sistemas de informação envolvidos fez-se a partir do modelo da Figura 2.10, uma análise das atividades do processo de desenvolvimento de produto. Os resultados da análise são apresentados na Tabela 2.3 verificando quais destas atividades ocorrem em cada fase e qual o sistema de informação envolvido. Esta análise é importante para que se entenda a utilização e o foco do sistema especialista desenvolvido quando inserido no processo de desenvolvimento do produto o qual se inicia com a fase de projeto informacional.

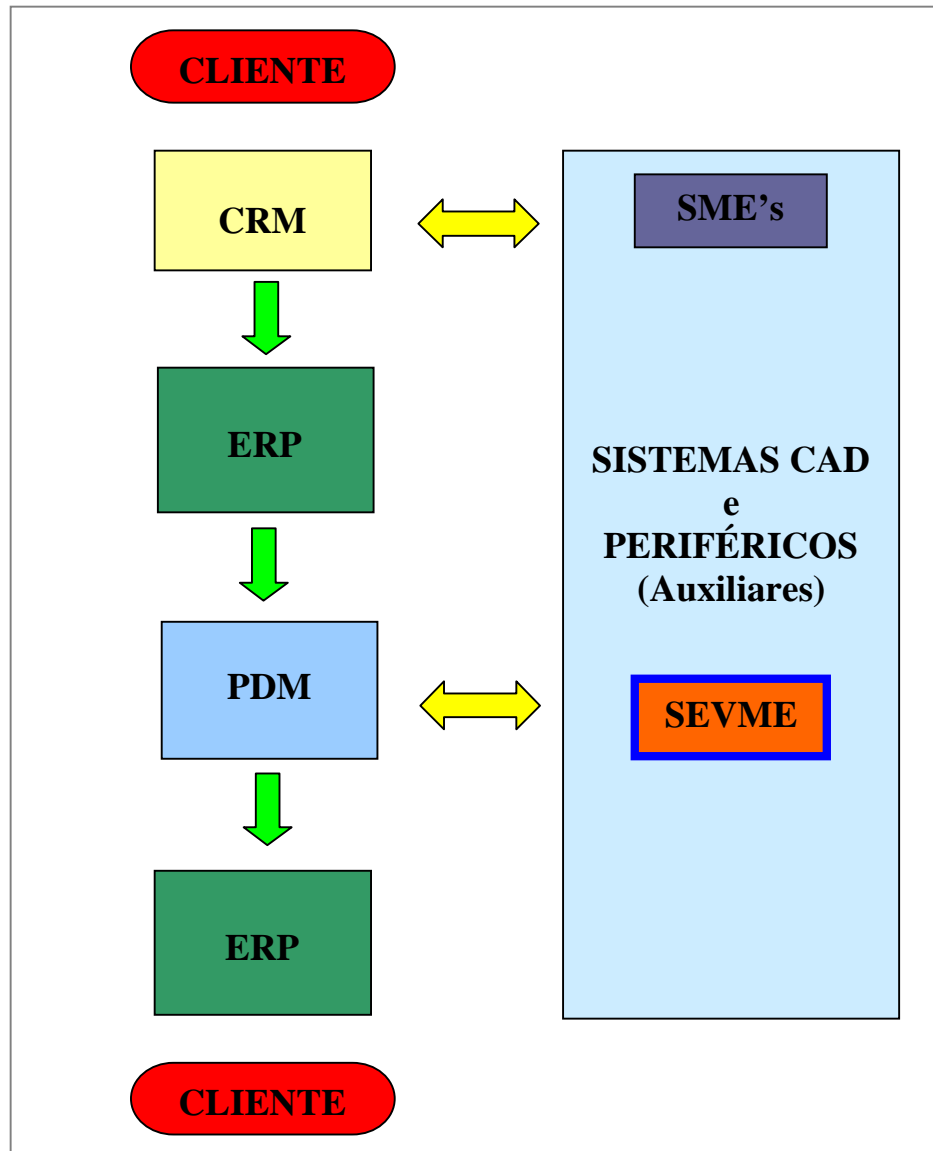


Figura 2.11 - Macro visão dos sistemas de informação envolvidos no processo desenvolvimento de produtos da empresa.

O sistema CRM, usado pela área de vendas para gerenciar seu relacionamento com o cliente e configurar o produto, é responsável por armazenar as informações coletadas junto ao cliente e convertê-las em requisitos de projeto. Neste momento está sendo executada a fase de projeto informacional.

A configuração do produto na prática consiste em cadastrar as informações coletadas junto ao cliente, na forma de características e valores. Na tabela A1.3 do item A1.2 do Apêndice 1 encontram-se explicações e um exemplo prático de configuração de um motor elétrico.

Tabela 2.3 – Fases do processo de desenvolvimento de projeto na empresa alvo.

Fase do Projeto	Sistema	Depto Responsável	Atividade	Descrição
Informacional	CRM	Vendas	Configurar produto	Coleta as necessidades do cliente e transforma em requisitos do produto
Conceitual	ME's /CAD	Vendas	Criar Desenho de Aprovação	Cria um desenho simplificado, com informações dimensionais básicas e requisitos especiais do cliente
Conceitual	CRM/ ERP	Vendas/ Cliente	Aprovar desenho	Aprova o desenho, define os requisitos finais do projeto e implanta a Ordem de Venda.
Preliminar	PDM	Engenharia	Definir SSCs padrões	Gera BOM básica, selecionando os SSCs padrões/ opcionais da linha
Detalhado	CAD/ PDM	Engenharia	Criar SSCs especiais e a BOM Final	Altera a BOM básica usando SSCs especiais para gerar a BOM final
Detalhado	“SEVME”	Engenharia	Verificar a BOM Final	Verificar o projeto analisando os SSCs especiais utilizados na BOM.
Preparação para Produção	PDM/ ERP	Engenharia/ PCP	Transferir e Criar a BOM na Produção	O sistema ERP importa a BOM Final assim que detectar que a mesma foi finalizada no sistema PDM

Nem sempre, durante a configuração, existe no sistema um valor adequado a necessidade do cliente. Como exemplo suponha que além da cor externa vermelha, o cliente deseje que internamente o produto seja pintado de azul. Esta opção, de selecionar uma cor interna específica, torna o produto especial e resulta na necessidade de criar um desenho específico com esta necessidade do cliente.

Integrado ao CRM, o sistema SME é responsável pela geração deste desenho, através de sistemas CAD, o qual representa o conjunto de aprovação de um motor elétrico. O SME é considerado um sistema periférico, por ser uma ferramenta auxiliar aos sistemas principais. O desenho do conjunto gerado, conforme exemplo A1.1 do Apêndice 1, depois de aprovado pelo cliente, é incorporado como uma informação, um valor de uma característica, da configuração do produto. Comparando com as fases do desenvolvimento, esta etapa pode ser considerada a fase de projeto conceitual, pois o resultado é um desenho conceitual, com as informações

necessárias para que o cliente possa decidir ou não pela aprovação do produto. Uma vez aprovado o desenho, estão definidos todos os requisitos do produto que servirão de entrada para o início da fase de projeto detalhado.

Concluídas as etapas de aprovação e negociação comercial, o próximo passo é concretizar a venda do produto. A implantação do pedido de compra e venda inicia-se pelo sistema CRM e se concretiza no sistema ERP. O sistema ERP, cujo termo é usado para denominar o *software* multimodular responsável por executar um conjunto de atividades que tem o objetivo auxiliar a gestão de uma empresa nas importantes fases de seu negócio, conforme estudo aprofundado realizado por Barella (2000). Uma das atividades executadas pelo sistema ERP é o planejamento da produção, o qual tem como base a estrutura dos produtos, máquinas e ferramentas do processo produtivo. A estrutura de produto pode ser introduzida manualmente no sistema ERP ou gerada em um sistema secundário ao sistema ERP, como no caso da empresa alvo esta tarefa é executada pelo sistema PDM.

Sistemas PDM (Gerenciador de Dados do Produto), são sistemas responsáveis por armazenar e permitir o gerenciamento das principais informações do produto administradas pelas engenharias. Entre estas informações têm-se os dados gerais do produto, como a denominação, peso e unidade de medida, além da classificação (características e valores), desenhos e principalmente a estrutura do produto (BOM). O sistema PDM da empresa alvo é dotado de um módulo responsável pela seleção dos componentes que formam a BOM de um produto padrão ou com opcionais. Neste processo o sistema localiza os componentes que atendem aos requisitos dos clientes com base nos valores de características definidos no processo de configuração do produto. O resultado desta seleção de componentes pode ser considerado como a fase de projeto preliminar, pois serve como base para o projeto detalhado no caso de produtos especiais.

O alvo neste trabalho são as estruturas de produtos especiais, as quais depois de geradas pelo sistema PDM são modificadas pelo projetista. Uma vez executadas as modificações perde-se qualquer garantia de integridade entre as partes (componentes) anteriormente selecionadas pelo sistema PDM. Como exemplo, um projetista, ao substituir o eixo normal do conjunto “A” da Figura 2.12 por outro com um diâmetro maior, pode gerar um erro de projeto conforme mostrado no conjunto “B” da mesma figura. Neste exemplo a interferência entre o eixo e as demais partes

pode ficar acima da tolerância máxima permitida, o que impede a montagem do conjunto.

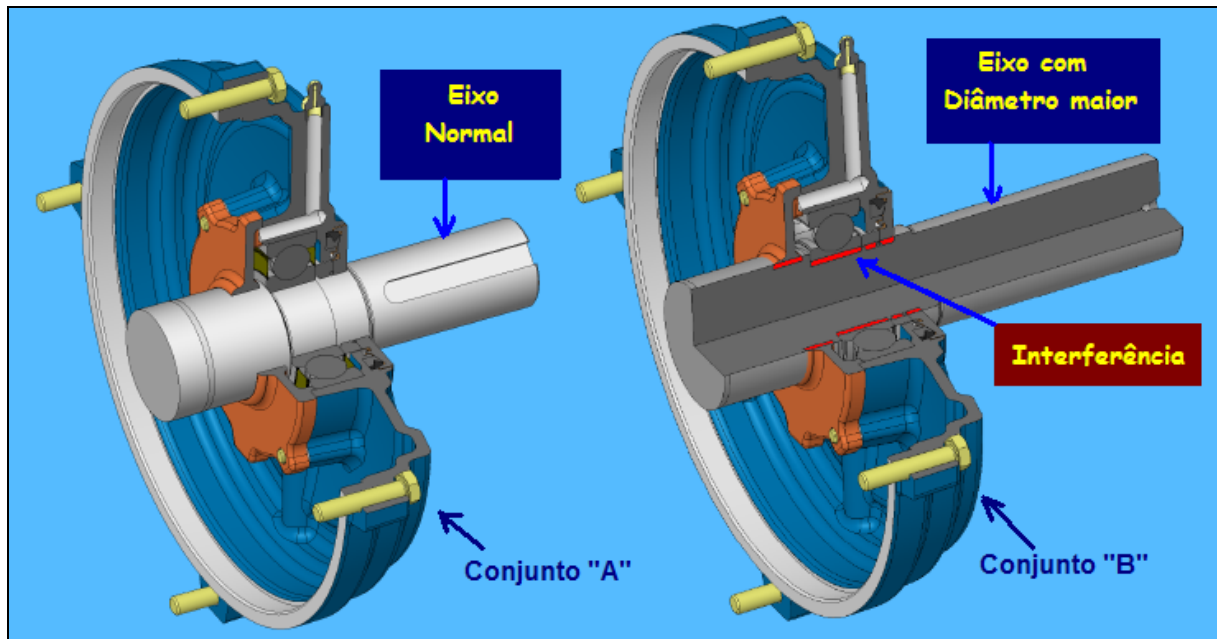


Figura 2.12: Exemplo de conjunto de mancal dianteiro de motor elétrico.

O processo de adequação da BOM padrão, em função da análise das especialidades, ocorre na fase de projeto detalhado. O projeto detalhado tem como atividade central definir as especificações finais, compostas pelo detalhamento dos SSCs (Sistemas, subsistemas e componentes), desenhos finais com tolerâncias, projeto de embalagem e a estrutura de produto (BOM final).

O SEVME (Sistema Especialista Verificador de Motores Elétricos), protótipo desenvolvido neste trabalho, é considerado um sistema periférico auxiliar ao sistema principal PDM. Seu objetivo é auxiliar na atividade de verificação da estrutura do produto. O sistema PDM é o provedor dos dados de entrada necessários para execução do SEVME. Estes dados de entrada são a estrutura do produto e as características do motor e dos componentes selecionados e modificados pelo projetista.

Concluída a verificação da estrutura do produto, esta é transferida para o sistema ERP o qual então pode planejar a fabricação dos componentes e a montagem do produto final. O fechamento deste ciclo ocorre com a produção, seguido da expedição e da entrega do produto ao cliente.

2.5 O processo de projeto e a estrutura do produto (BOM)

Uma das atividades executadas na finalização da etapa de projeto detalhado é a verificação dos *deliverables* (entregas, resultados esperados) desta etapa. Estas entregas são a documentação e os itens, desenhos e a estrutura do produto (BOM).

Conforme exposto no item 1.2 do capítulo de introdução, a manipulação da estrutura do produto, executado pelo projetista para atender as especialidades solicitadas pelo cliente, pode gerar problemas e erros na BOM final. A atenção, cuidado e experiência do projetista nesta fase são vitais para evitar a ocorrência de erros, mas como ser humano que é, sempre existe a possibilidade de falha.

Apesar de ser considerada como a última tarefa da atividade de criar e detalhar os SSCs, completar e atualizar a estrutura de produto acontece continuamente durante o detalhamento do produto. A cada vez que se cria um item, deve-se inseri-lo na estrutura de produto (ROZENFELD et al., 2006). Este processo é comprovado na empresa alvo.

A estrutura de produto (BOM) contém a identificação dos itens (SSCs) e dos relacionamentos entre eles, assim como a conexão desses itens com todos os documentos relacionados. A BOM é uma fonte de informações fundamental para manufatura, pois contém as informações utilizadas por todos os setores e processos envolvidos com a manufatura do produto (ROZENFELD et al., 2006).

A falta de qualidade das informações fundamentais como a BOM, é uma realidade em muitas empresas que não tem a garantia de uma estrutura de produto completa e precisa. Esta falta de qualidade das informações fundamentais, tem sido resumida por meio da expressão “garbage in, garbage out”, ou seja, se os processos da empresa estão manipulando informações sem qualidade, conseqüentemente, os resultados alcançados por esses processos também estarão comprometidos (ROZENFELD et al., 2006).

Ainda segundo Rozenfeld et al. (2006), a maioria das empresas de manufatura sempre esbarra nas seguintes questões: O meu produto tem diversos opcionais e alternativas, como conviver com o grande número de estruturas de produto necessárias? Como a estrutura de produto pode refletir diferentes estratégias de estoque? Como conviver com mais de uma estrutura de produto? Quem é o “dono” da estrutura de produto? Como simplificar a estrutura de produto? Como aumentar a precisão das informações?

Em resposta, Rozenfeld et al. (2006) comentam que “a maioria das empresas só conhece a BOM padrão com a estrutura pai e filho, e assim não consegue responder a essas questões de forma apropriada. Para isso, deve-se conhecer os tipos de BOM existentes e seus elementos, além de quando e como o melhor tipo deve ser aplicado”. A estrutura do tipo pai e filho é aquela na qual todos os materiais necessários para montagem do item final estão listados no primeiro nível da estrutura do produto.

A seguir são apresentados os tipos de BOM utilizados nos produtos como os quais o sistema especialista deste trabalho se relaciona.

2.5.1 Tipos de BOM e sua utilização no motor elétrico

Neste item do capítulo apresentam-se informações mais detalhadas no que se refere aos tipos de BOM que se pode utilizar para organizar os materiais para formar uma estrutura de produto.

Dos vários tipos de BOM e elementos, nem todos são sempre possíveis de ser usados. Seu uso depende dos sistemas PDM, PLM ou ERP que a empresa dispõe e dos recursos e particularidades dos mesmos. Dentre os sistemas ERP mais completos atualmente no mercado está o SAP (Soluções em Aplicações e Produtos). A SAP é uma empresa Alemã e está no mercado há pelo menos 35 anos.

A empresa alvo está em processo de transição entre o atual sistema ERP, do fabricante Baan, e o sistema ERP da SAP. O sistema da SAP suporta os vários tipos de BOM, cujos conceitos a seguir apresentados no Quadro 2.2, foram obtidos de Rozenfeld et al. (2006).

A modularidade é a capacidade de construir um produto ou processo a partir de partes menores (chamados módulos) e que podem ser projetadas independentemente e ainda assim funcionar juntas como um todo. Uma BOM específica descreve exatamente um produto, a BOM modular, uma variedade de produtos.

Quadro 2.2 – Tipos de BOM

BOM simples/padrão: a BOM mais simples possível é a de dois níveis, um deles corresponde às matérias-primas e itens comprados e outro, ao produto final. Para um melhor controle de produção são criados subconjuntos intermediários, gerando uma BOM de vários níveis.

BOM modular: a BOM modular estrutura todas as opções dos módulos e serve de base à BOM de planejamento e à BOM genérica (ROZENFELD et al., 2006).

BOM de Planejamento: a BOM de planejamento resulta da BOM modular e contém a porcentagem de cada opção por módulo.

BOM genérica: a estrutura de produto genérica é uma aplicação do conceito de BOM modular para as atividades de vendas técnicas e controle de configurações, assim como a BOM de planejamento é uma aplicação para a previsão de vendas e planejamento mestre da produção.

BOM de manufatura: a BOM de manufatura representa a integração lógica da estrutura de produto e do plano de processo.

BOM para Informação: consiste de um conjunto de relatórios gerados pelos sistemas de informação para suportar análises diversas sobre a BOM e seus itens.

Lista de Objetos (*Bill of Objects*): é um tipo de BOM que permite a um produto possuir qualquer tipo de objeto como filho, por exemplo, documentos, arquivos multimídia, modelos geométricos (ROZENFELD et al., 2006).

2.5.2 Variações da BOM e BOM única

É fato que os diferentes usuários em uma empresa possuem necessidades distintas, e desta forma existe uma tendência natural de cada qual querer criar sua própria BOM. Poderia-se, desde que suportado pelos sistemas ERP, PDM, PLM, ter uma BOM para engenharia, outra para produção, uma para vendas e até para determinação do custos. Estas são as principais utilizações de BOM disponíveis nos principais sistemas ERP.

Criar BOMs distintas pode se tornar bastante complexo sob o ponto de vista do esforço e tempo de manutenção das mesmas, visto que acaba se gerando redundância de informações e, conseqüentemente, incorrendo no risco de inconsistência por falta ou erro na atualização. Rozenfeld et al. (2006) recomendam outras referências para obter informações mais detalhadas do assunto.

A BOM utilizada no processo de projeto de motores elétricos é a BOM de vários níveis. Em seu primeiro nível ela é formada por vários conjuntos de

submontagens ou itens intermediários, os quais precisam ou não ser estocados. Uma BOM de vários níveis é a estrutura mais conhecida, também chamada de BOM padrão (Rozenfeld et al., 2006).

2.5.3 A Utilização de Item fantasma e pseudo-item

Dentro dos vários tipos de BOM, para uma melhor organização, melhor planejamento e controle da produção é prática comum o uso de itens fantasma ou pseudo-itens. Itens fantasma, são aqueles produzidos no processo de manufatura, possuem “pais” definidos, mas não são estocados. Apesar de existirem fisicamente, são rapidamente consumidos como componentes do item de nível imediatamente superior na BOM (Rozenfeld et al., 2006)

Um pseudo-item é uma coleção artificial de componentes que são agrupados para serem utilizados no planejamento. Ao contrário dos itens fantasmas, entretanto, seus componentes não podem ser montados para produzir um item-pai que exista fisicamente (Rozenfeld et al., 2006).

O uso de Itens fantasma e principalmente pseudo-itens é prática comum nas estruturas de um motor elétrico e são denominados conjuntos ou subconjuntos. Um exemplo de pseudo-item é o subconjunto identificado pelo código de item “6824.1645/F02 -TPA DIAN 213/5T” e está mostrado na Tabela 2.4 e representado na Figura 2.13 no qual estão o componente principal do conjunto (a tampa), os elementos de fixação, vedação e demais componentes que são utilizados para cumprir as funções deste conjunto no projeto do motor elétrico.

Tabela 2.4 – Exemplo de um conjunto de tampa dianteira de motor elétrico.

Material	Nr	Quant	Unid. Medida	Denominação
1) 6824.1645/F02	2400	1,0000	PÇ	TPA DIAN 213/5T
2) 6824.1645	2401	1,0000	PÇ	TPA DIAN 132
3) 6824.1645Z	10	1,0000	PÇ	TPA DIAN 132
4) 8000.5466	10	2,1000	KG	FERRO FUNDIDO FC-200 MET-1
2) 0344.1504	2405	4,0000	PÇ	PARAF SEXT M8X40
2) 6664.2208	2415	1,0000	PÇ	ANEL FIX 213/5
3) 6664.2208Z	10	1,0000	PÇ	ANEL FIX 213/5
4) 8000.5466	10	0,3500	KG	FERRO FUNDIDO FC-200 MET-1
2) 0343.1258	2420	2,0000	PÇ	PARAF CIL C/FENDA M6X40
2) 0355.2063	2425	2,0000	PÇ	ARRUELA LISA LATÃO 6X11

O uso dos termos item fantasma e pseudo-item na empresa alvo, possivelmente por falta de conhecimento teórico, não está alinhado com o exposto por Rozenfeld et al. (2006). Isto entretanto é apenas questão de interpretação, visto que a teoria se aplica perfeitamente na prática.

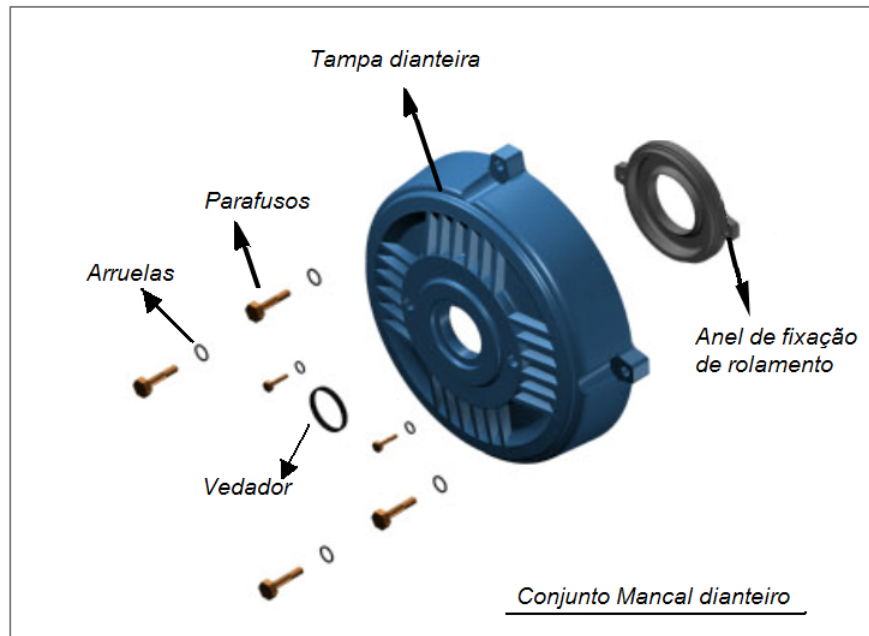


Figura 2.13 - Conjunto tampa dianteira de motor elétrico. Exemplo de um Pseudo-item.

O termo conjunto fantasma é utilizado na empresa alvo para designar os conjuntos que são segundo Rozenfeld et al. (2006), chamados de pseudo-itens, ou seja, que não geram ordens de produção e não tem inventário. Os itens fantasma são itens que geram ordens de produção e são denominados na empresa alvo apenas como conjuntos de montagem.

Um dos conjuntos que formam o motor elétrico é o conjunto Rotor completo o qual é composto em sua estrutura de um rotor de gaiola e de um eixo, conforme Figura 2.14. Na estrutura do motor elétrico da empresa-alvo, o conjunto rotor completo tem ordens de produção, diferentemente dos conceitos de Rozenfeld et al. (2006) no qual este conjunto foi considerado um pseudo-item. É bem verdade que o rotor de gaiola que compõe o rotor completo, é em alguns casos um exemplo de pseudo-item, no caso de motores acima da carcaça 225. Esta situação ocorre nos casos em que as operações de produção utilizadas para fabricar o conjunto rotor de gaiola e a operação de prensar o eixo no rotor, operação que resulta no rotor

completo, requerem um processo de prensagem a quente e são neste caso executadas no mesmo posto de trabalho.

A operação neste caso é executada no mesmo posto de trabalho com objetivo de aproveitar o fato de o rotor estar aquecido e portanto dilatado, o que facilita a prensagem do eixo no rotor. Para os casos de rotores menores, para motores abaixo da carcaça 225, a operação de prensagem é executada em outro posto de trabalho e tem portanto uma ordem de produção para fabricação do rotor de gaiola e outra ordem para as operações usadas na fabricação do conjunto rotor completo.

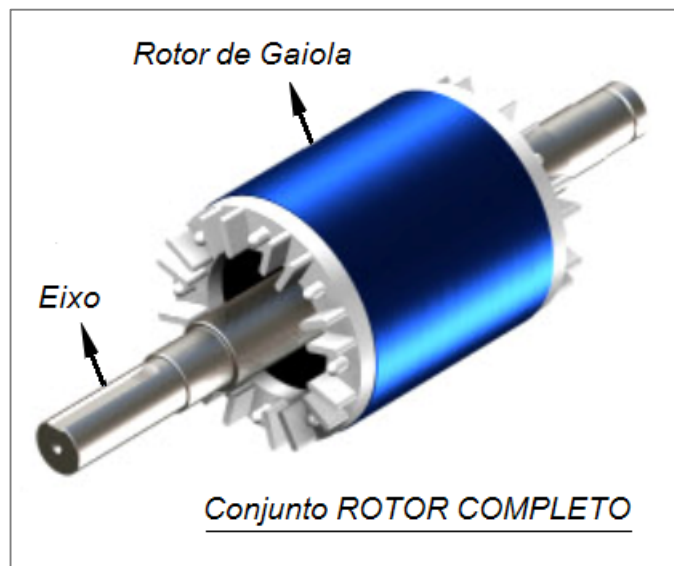


Figura 2.14 - Conjunto Rotor completo de um motor elétrico. Exemplo de conjunto Fantasma.

Neste exemplo os componentes são agrupados com objetivo de melhor organizar a estrutura do produto, já que toda vez que o projetista utiliza em um projeto o item da tampa dianteira do conjunto, terá também que estruturar os elementos de fixação e vedação. Este conjunto não tem inventário.

Este item do capítulo teve por objetivo conhecer detalhes relacionados aos dados que são usados no desenvolvimento do sistema especialista. Em particular o uso de conjuntos nas estruturas e as conseqüências de uma alteração.

2.6 Justificativa da relevância do problema

Atualmente o grande volume de projetos executados diariamente impede que uma verificação mais detalhada e atenciosa seja realizada e as divergências entre lista de componentes e especificações nem sempre são percebidas na fase de projeto. Quando em fase de produção, o controle de qualidade através de métodos de inspeção ou a experiência dos colaboradores da linha de produção são capazes de identificar erros informados em relatórios de não conformidade. O percentual de erros e a importância de evitar que estes ocorram demonstram claramente que se tem o conhecimento do problema o qual se propõe minimizar com uso de sistema especialista.

O processo de inspeção não torna o processo robusto, pelo contrário, mostra a fragilidade e a probabilidade de que o produto chegue às mãos do cliente com a divergência. A Tabela 2.5 abaixo mostra os setores de origem dos erros de projeto, a quantidade de erros e porcentagem destes durante o acompanhamento mensal deste indicador pelo Departamento de Engenharia do Produto. O sistema SEVME foi desenvolvido para ser utilizado por usuários que trabalham no detalhamento de projeto (35%) e de modificações de projeto (10,8%), podendo desta forma contribuir para redução de erros nestas duas atividades e que são responsáveis por 45% dos erros.

Tabela 2.5 - Origem e porcentagem dos erros de projeto durante o ano de 2005.
Fonte: documentos internos da empresa alvo.

Setor (origem do erro)	Porcentagem por setor
Detalhamento de projeto	35%
Desenvolvimento	11,4%
Sistema	16,2%
Modificações de projeto	10,8%
Não procedem	26,56%
Total	100%

O percentual de erros gerados pelo Departamento de Engenharia do Produto é acompanhado mensalmente, e pode ser visto na Tabela 2.6 junto a outro indicador, chamado de Solicitação de Ação Corretiva (SAC). As SACs emitidas pela área fabril

para a engenharia objetiva corrigir o projeto com base em um erro ou divergência encontrado na produção.

Os erros identificados na Tabela 2.6 não chegaram ao cliente, mas geraram refugos, re-trabalho, alteração da data de entrega do produto gerando assim prejuízos tangíveis e intangíveis para a empresa.

Tabela 2.6 - Reclamações internas causadas por erros de projeto no ano 2005.
Fonte: documentos internos da empresa.

	Período considerado									
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maior	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Média
%SAC's por projeto	10,77	12,65	15,11	9,95	6,67	9,19	8,21	7,67	11,76	9,21
% Erros por projeto	3,22	2,9	2,4	1,57	1,3	2,38	1,28	2,17	2,99	2,25

Em casos onde o erro não é identificado dentro do processo de projeto ou produção, certamente pode atingir o cliente. Como exemplo, pode-se supor um caso fictício onde um único erro pode estar relacionado a um lote com 100 unidades de um produto, se este produto estiver destinado ao mercado europeu, podem-se relacionar os seguintes prejuízos e conseqüências:

- Tempo de re-projeto de componentes;
- Fabricação de novos componentes;
- Transporte dos componentes ao cliente;
- Mão-de-obra para a substituição dos componentes;
- Repercussão negativa do nível de qualidade da empresa;

Há que se avaliar custos, neste caso, incalculáveis relativos à repercussão negativa da imagem da empresa perante o cliente envolvendo erros de projeto. Estes custos podem ser minimizados pelo uso do sistema SEVME.

2.7 Resumo do capítulo

O motor elétrico é um dos mais notórios inventos do homem ao longo de seu desenvolvimento tecnológico: simples, de custo reduzido, versátil, não poluente. Conforme Filippo (2000), “estima-se que mais de 40% de toda a energia elétrica

consumida no país é destinada ao acionamento de motores elétricos em geral. No setor industrial como um todo, pouco mais da metade da energia elétrica é consumida por motores. São comuns as indústrias nas quais mais de 80% do consumo de energia elétrica é de responsabilidade dos motores. Os motores de indução trifásicos e monofásicos respondem por mais de 95% do total de motores instalados nos setores industrial, rural, comercial e residencial, sendo responsáveis por 75% do total de potência instalada do universo dos motores”. Seu emprego é garantido por suas características operacionais, permitindo o acionamento de praticamente todos os tipos de máquinas e equipamentos. Sua robustez garante longa vida útil, é de fácil instalação e manutenção. Cabe às empresas detentora de sua fabricação manter a evolução tecnológica, eficiência e rendimento destas máquinas, utilizando para isso as modernas técnicas que envolvem a cadeia produtiva do motor.

Os tópicos apresentados sobre o processo de projeto ratificam a necessidade de utilizar ferramentas e dispositivos que auxiliem o projetista, especialmente nas fases iniciais, onde diversas decisões são tomadas e impactam significativamente nos custos do projeto. Somado à necessidade de tomada de decisão está a falta de conhecimento sobre diversos aspectos que permeiam o projeto do produto: suas diferentes fases no ciclo de vida, as características de cada utilização e outros detalhes que apenas projetistas com mais experiências e a muito custo encontrariam as soluções. Consultá-los, adquirir seu conhecimento especializado e dispô-lo a outros projetistas passa a ser uma questão de bom senso, economia de recursos, um meio de garantir ou preservar a qualidade de novos projetos. Conforme SILVA (1998), “desenvolver um sistema especialista para a tarefa de projetar necessita entender como os projetistas pensam”.

O capítulo seguinte aborda conceitos e aspectos sobre inteligência artificial, sistemas especialistas, análise de viabilidade e aplicabilidade dos sistemas especialistas, além de abordar o modelo de desenvolvimento incremental e a fase de aquisição do conhecimento no desenvolvimento do sistema protótipo. Este sistema é aplicado na fase de projeto detalhado de motores elétricos industriais, especificamente na atividade de verificação da estrutura do produto.

CAPÍTULO III

INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E SISTEMAS ESPECIALISTAS

O *software* proposto neste trabalho atua como uma ferramenta de auxílio, utilizada na fase de projeto detalhado de motores elétricos industriais, especificamente na atividade de verificação da estrutura do produto. Sua construção está baseada nos princípios de sistemas especialistas e neste capítulo são apresentados os conceitos relacionados, os pontos chave para analisar a viabilidade e adequação deste tipo de sistema à área de aplicação relacionada ao trabalho.

As etapas do processo de desenvolvimento, o modelo de desenvolvimento e a fase de aquisição são também apresentados.

3.1 A História da Inteligência Artificial e dos Sistemas Especialistas

Desde a história antiga, mitos gregos incorporavam a idéia de robôs inteligentes e artifícios quase humanos. Muitos brinquedos mecânicos e modelos foram construídos por pessoas reais tentando representar a capacidade humana. Aristóteles, no século V a.C., desenvolvia os primeiros sistemas dedutivos formais baseados na lógica. Um papiro do século III antes de Cristo representava 48 observações cirúrgicas com sintoma, diagnóstico, tratamento e prognóstico, combinados como uma programação: se o paciente tem este sintoma, então ele tem esta doença com este prognóstico e este tratamento devendo ser aplicado (NORDLANDER, 2001).

Já no século XVII, Hobbes publicou sua teoria sobre o pensamento humano. Pascal criou a primeira calculadora digital. No século XVIII diversos brinquedos mecânicos foram desenvolvidos. Em 1832 Charles Babbage projetou a “máquina analítica”, um computador mecânico programável. Anteriormente ele tinha projetado

a “máquina diferencial”, mais limitada e que não foi completamente terminada (NORDLANDER, 2001).

Em 1937 Alan Turing concebeu a máquina de Turing capaz realizar operações inviáveis até então para outras máquinas computacionais. Entretanto, mesmo reconhecendo que havia certos cálculos que máquina nenhuma poderia realizar, Turing não duvidava que os computadores poderiam “pensar”. Em 1943 Walter Pitts e Warren McCulloch mostraram como uma rede neural artificial computaria realizando rotinas de cálculo que retornavam a etapas anteriores na forma de looping. Em 1948 Norbert Wiener publicou um livro chamado “Cybernetics”, que significava a ciência do controle e comunicação entre animal e máquina (NORDLANDER, 2001).

O termo “inteligência artificial” que não constava no vocabulário, passou a ser utilizado a partir de 1950. O Quadro 3.1 apresenta resumidamente uma série de fatos relevantes registrados na história a contar desta data e que é contada em mais detalhes por Nordlander (2001).

Quadro 3.1 – Fatos da história da Inteligência Artificial.

<p>1950: Turing propôs o <i>Teste de Turing</i> capaz de reconhecer a inteligência artificial.</p> <p>1955 e 1956: Allen Newel, Herbert Simon e J.C. Shaw escreveram o primeiro programa de inteligência artificial.</p> <p>1956: John McCarthy cunhou o termo “Inteligência Artificial” durante uma conferência sobre máquinas pensantes na Universidade de Dartmouth.</p> <p>1958: John McCarthy e Marvin Minsky fundaram o primeiro laboratório de inteligência artificial, no <i>Massachusetts Institute of Technology</i>. McCarthy desenvolveu a programação LISP.</p> <p>1961: O engenheiro Mortimer Taube publicou o livro “Computadores e o Senso Comum: o Mito das Máquinas Pensantes”.</p> <p>1963: A Universidade de Stanford fundou seu laboratório de inteligência artificial.</p> <p>1966: Realizado em Edimburgo o primeiro <i>workshop</i> sobre máquinas inteligentes.</p> <p>1967: Em Stanford, desenvolvido por Edward Feigenbaum e colegas, o programa DENDRAL interpretava a massa espectral em compostos químicos orgânicos.</p> <p>1971 e 1972: Alain Colmerauer e Phillipe Roussel escreveram a linguagem de programação PROLOG.</p>
--

O programa DENGRAL foi o primeiro programa baseado em conhecimento para utilização científica de sucesso. A linguagem PROLOG após revisão em 1974 para forçar o uso de operadores lógicos como “se....então.....” permitiu solucionar problemas que mostravam quando algo não era verdadeiro em um número finito de passos (NORLANDER, 2001).

Nos anos de 1990 foram criadas algumas definições clássicas para inteligência artificial, as quais são válidas ainda nos dias atuais e apresentadas conforme Lustosa (2004):

“Campo de estudo que procura explicar e emular comportamento inteligente em termos de processos computacionais” (SCHALKOFF, 1990).

“Um ramo da ciência da computação que se dedica à automação de comportamento inteligente” (LUGER e STUBBLEFIELD, 1993).

A partir dos anos de 1970 inicia-se um ramo da inteligência artificial com o qual surgem os assim denominados Sistemas Especialistas. O Quadro 3.2 apresenta, conforme pesquisa realizada por Nordlander (2001), alguns dos principais e precursores *softwares* de sistemas especialistas desenvolvidos deste então.

Quadro 3.2 – Sistemas Especialistas e fatos importantes a partir de 1970.

1972: Na universidade de Stanford, desenvolveu-se o MYCIN, para diagnóstico de infecções sangüíneas e recomendações antibióticas.

1975: Marvin Minsky publicou um influente artigo sobre estruturas de representação do conhecimento.

1979: Bill VanMelle's, em seu doutorado na Universidade de Stanford, demonstrou as generalidades da representação do conhecimento do programa MYCIN em seu programa EMYCIN.

Anos 70: McDermott na Universidade de Carnegie Mellon desenvolve o primeiro sistema especialista comercial, o XCON (*eXpert CONfigure*).

Anos 80: A lógica Fuzzy foi introduzida em sistemas especialistas usados na automatização de metrô em Sendai, Japão.

1984: A *General Electric* construiu um sistema para diagnóstico elétrico de locomotivas.

1985: Os sistemas especialistas passaram a ser usados para reconhecer e corrigir o vocabulário.

Com o sistema especialista MYCIN em 1972, foi criada a primeira estrutura de programação de sistemas especialistas contendo uma máquina de inferência,

dispondo de lógica para as regras serem aplicadas. O MYCIN poderia ainda lidar com regras de probabilidade, o que o DENDRAL não era capaz de fazer. O sistema para automatização de metrô desenvolvido pela Hitachi no Japão, reduziu o consumo de energia em 10% e a margem de erros nas paradas dos trens em menos de 10 centímetros. O sistema especialista da General Electric, construído baseado no conhecimento de David Smith, profissional que estava perto de se aposentar, foi chamado de *Diesel Electric Locomotive Troubleshooting Aid* e era capaz de diagnosticar 80% das falhas além de fornecer instruções para reparo (NORDLANDER, 2001).

A partir dos Anos 90, começaram a surgir inúmeros *softwares* comerciais, que possibilitavam programações melhores e mais rápidas, funcionavam como tutores no reconhecimento de vocabulários, e como exemplo, as máquinas de lavar roupas ajustavam-se a diferentes condições de lavagem.

Toda esta história mostra que há muitos anos a inteligência artificial e os sistemas especialistas fazem parte do dia-a-dia. Muitos produtos comerciais possuem inteligência artificial nem sempre identificada e reconhecida por seus usuários, passando sua importância imperceptível aos olhos de quem a desconhece.

3.2 Definições a respeito dos Sistemas Especialistas (SE)

Conhecida a evolução histórica da Inteligência Artificial até se chegar ao seu ramo principal, o de Sistemas Especialistas, este item do capítulo apresenta os conceitos que nos fazem entender porque são assim denominados “especialistas”, suas particularidades, diferenças entre estes e os *softwares* convencionais baseados em algoritmos, além das condições para se aplicar este tipo de sistema e a participação do engenheiro do conhecimento e do especialista humano neste processo.

Uma definição clássica de sistemas especialistas proposta pelo Prof. Edward Feigenbaum, da Universidade de Stanford, citada por Giarratano e Riley (1994), descreve um sistema especialista como:

“Programa inteligente de computador que utiliza conhecimentos e procedimentos inferenciais para resolver problemas com grau de dificuldade suficiente para requerer significativa especialidade humana em sua solução (FEIGENBAUM, 1981).”

Outros autores ratificam a definição de Feigenbaum, associando o desenvolvimento de um sistema especialista a um programa inteligente, que utiliza conhecimento especializado para solucionar problemas em determinadas áreas do conhecimento. Para Silva (1998), um sistema especialista é um sistema computacional que emula a decisão com a habilidade de um especialista humano. O termo emular significa que o sistema especialista pretende agir em todos os aspectos como um especialista humano.

O conhecimento de um SE consiste em fatos e heurísticas. Os fatos constituem um corpo de informações. Heurísticas representam conhecimento informal, permitem um especialista encontrar a solução sem realizar análise detalhada de uma situação particular. Conforme Rich e Knight (1991) apud Silva (1998), “o termo heurística vem do grego *heuriken*, que significa descobrir. É também a origem da palavra eureka mencionada por Arquimedes ao descobrir o método para determinar a pureza do ouro”.

No sistema SEVME, objeto de estudo deste trabalho, foi possível a partir do conhecimento heurístico do especialista, identificar regras práticas que permitem rapidamente determinar quais verificações devem ser feitas. Como exemplo, tem-se o caso em que no projeto do motor usou-se um rolamento especial. Com bom senso, o verificador de projetos determina, entre outros, que devem ser verificados a blindagem e os diâmetros do rolamento e sua relação com diâmetro de assento do rolamento no eixo e o diâmetro para alojamento do rolamento na tampa do motor. Sem este conhecimento prático, um projetista inexperiente demoraria mais tempo na verificação ou até nem saberia qual deveria ser sua principal ação neste caso.

A Figura 2.12 no capítulo 2 apresenta um exemplo de conjunto de montagem de rolamento, eixo e tampa. Uma das vantagens comumente atribuídas aos sistemas especialistas é sua capacidade de explicar a lógica em que a decisão está baseada, ou seja, porque certas perguntas foram feitas e/ou porque uma alternativa foi eliminada ou selecionada. Os exemplos de aplicação de sistemas especialistas são muitos: controle de processos, garantia da qualidade, otimização de solução de problemas, simulação, diagnóstico, projeto de sistemas, rotinas para detecção de defeitos, diagnósticos de causa e efeito, otimização de projetos, entre outros. Além dos campos de engenharia citados, são utilizados em áreas como testes de seleção, marketing, finanças e negócios, prognósticos de atividades e desempenho, entre outros.

O conhecimento e heurísticas utilizados por um sistema especialista requerem ser adquiridos e organizados de forma a se tornarem informação e conhecimento úteis na busca de uma solução. Os responsáveis por este processo são o Engenheiro do Conhecimento e o Especialista Humano, cujos papéis e atribuições são a seguir explicadas.

3.2.1 O Engenheiro do Conhecimento e o Especialista Humano

Em sistemas convencionais a especificação de um sistema é atribuída a profissionais denominados analistas de sistemas e a construção ou desenvolvimento aos programadores. O profissional responsável por estas atribuições em sistemas especialistas, é chamado de Engenheiro do Conhecimento (EC). O EC é responsável pelo desenvolvimento e por adquirir o conhecimento, além de outras atribuições que incluem desde analisar e especificar o sistema, definir os especialistas que devem participar do processo, utilizar técnicas de representação do conhecimento e de relacionamento interpessoal e comunicação.

Na fase de aquisição ocorre geralmente intensa interação com o especialista, este processo se dá por meio de entrevistas, observação visual, questionários, leitura de material ou livros sobre o assunto. É fundamental que o EC tenha uma fundamentação em representação, aquisição e implementação do conhecimento, pois estas são suas responsabilidades principais. Todo conhecimento adquirido, deve ser representado, implementado e posteriormente mantido em função de atualizações necessárias. O desenvolvimento de um SE, haja vista a componente dinâmica do conhecimento e a metodologia utilizada, está em constante evolução.

O EC entretanto não conseguirá criar um sistema especialista com origem em uma idéia brilhante que lhe surgiu em um momento de inspiração. Faz-se necessária participação e contribuição de especialistas. Os especialistas humanos (EH), são assim denominados, por deterem o domínio de um conhecimento específico que é base da construção de um sistema especialista. Uma das dificuldades de construir sistemas especialistas surge na aquisição do conhecimento dos especialistas humanos para transformá-las em regras (NORLANDER, 2001).

Estas dificuldades puderam ser experimentadas pelo EC durante o processo de aquisição de conhecimento para o desenvolvimento do sistema SEVME. O EH, ainda que conhecendo as informações e formas de resolução do problema, por vezes, por desconhecer a necessidade, omitia informações as quais lhe pareciam

óbvias e triviais. Neste desenvolvimento é fundamental ao EC ter conhecimento prévio no domínio pois permite questionar e conduzir o processo de entrevistas utilizado na fase de aquisição de conhecimento.

Passos (2005) apresenta com propriedade os conceitos relacionados à Engenharia do Conhecimento a qual define como um processo que consiste em adquirir o conhecimento de um EH e representá-lo de forma a possibilitar uma codificação computacional de maneira interativa.

O Especialista Humano (EH) é uma pessoa que irá fornecer ao EC o conhecimento em uma área específica, necessário para construção do sistema especialista. As principais características necessárias e avaliadas em um EH são:

- Competência e reputação entre seus pares;
- Capacidade de articulação;
- Autoconfiança;
- Disponibilidade;
- Mente aberta
- Facilidade de relacionamento.

Conforme Lustosa (2004), os sistemas especialistas restringem-se somente a alguns domínios específicos do conhecimento, tentando reproduzir boa parte do conhecimento de um especialista em determinado assunto. Ainda é inviável pensar na implementação de sistemas que respondam e reajam sobre temas gerais utilizando bases de conhecimento. A representação considerando sistemas gerais, requerer uma base extremamente extensa e inviável de ser construída por mãos humanas.

Quando desenvolve um sistema especialista, o engenheiro do conhecimento penetra em um universo do conhecimento altamente especializado, que possui gírias, jargões, definições e para seu perfeito entendimento necessita de prévio conhecimento a respeito do assunto. Se o usuário de um sistema especialista é uma pessoa que desconhece as definições, princípios e linguagem comum deste domínio, tal falta deverá ser preenchida com o acréscimo de regras e explicações do sistema de modo a permitir que o usuário avance no programa. Um sistema, à medida que toma dimensões muito maiores e passa a necessitar de conhecimento geral para reduzir a falta de conhecimento do usuário, tende a perder um de seus objetivos, o de representar conhecimento especializado.

Entende-se com as explicações deste item do capítulo que um sistema especialista só poderá ser construído com a participação do EC e EH, os quais juntos constroem a base de conhecimento. Base esta utilizada pela máquina de inferência do sistema, gerando resultados apresentados por meio de uma interface com o usuário do sistema. Estes novos termos recém citados são apresentados no item 3.3.

3.3 Os elementos de um Sistema Especialista

Um sistema especialista é composto por um conjunto de elementos, apresentados na Figura 3.1 , que garantem sua funcionalidade e execução. Cada um dos elementos serão apresentados com informações encontradas na literatura.

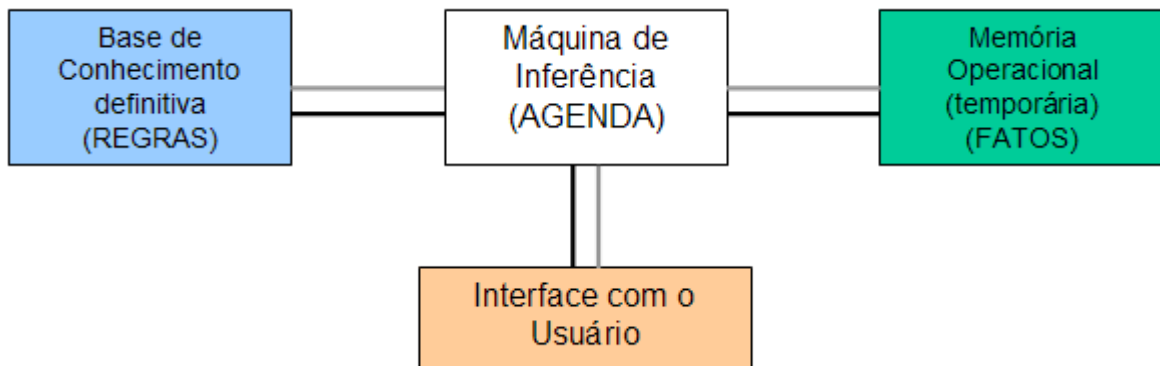


Figura 3.1 - Elementos típicos de um sistema especialista.

3.3.1 Base de conhecimento

Este módulo de um sistema especialista representa a memória de longo prazo, armazena todo conhecimento relevante e necessário para resolução do problema específico, proveniente de diversas fontes e codificado no sistema de maneira inteligível. Normalmente este conhecimento, que se torna definitivo no sistema, é representado e codificado na forma de regras e objetos.

A base de conhecimento sem um dispositivo que o possa interpretar e utilizar não tem valor, mas com o uso de um mecanismo pode se transformar em uma ferramenta poderosa com eficácia comprovada por sistemas conforme exemplos

citados no Quadro 3.2. Este mecanismo, denominado Máquina de Inferência, é o módulo ou elemento do sistema apresentado no item 3.3.3.

3.3.2 Memória operacional

Representa o conjunto de fatos (simbolizando conhecimento de natureza temporária) usados pelas regras. É também chamada de memória de trabalho corrente do sistema, funciona como memória auxiliar contendo os fatos referentes ao problema em solução. Os fatos são constantemente confrontados, pela máquina de inferência, com a base de conhecimento em busca de informações adicionais ou soluções para o problema. Alguns módulos adicionais podem fazer parte de um sistema especialista, como o de aquisição e explanação.

3.3.3 Máquina de inferência

A máquina ou motor de inferência é o módulo que contém o mecanismo que decide quais regras são satisfeitas, ou seja, interpreta o conhecimento armazenado na base de conhecimento. A máquina de inferência examina a memória operacional, a qual contém os dados sobre o problema em questão, e fornece as conclusões e explicações adicionais quando solicitado pelo usuário. É por intermédio deste mecanismo, que os fatos, as regras, as classes e os objetos que compõem a base de conhecimento são aplicados no processo de resolução do problema.

A máquina de inferência utiliza-se de uma agenda. Esta agenda é uma lista de ativações (que correspondem às regras cujas condições estão satisfeitas) priorizadas de acordo com sua execução. As ativações são armazenadas em uma ordem de preferências na qual serão verificadas pela máquina de inferência (GIARRATANO & RILEY, 1994).

A capacidade do motor de inferência é baseada em uma combinação de procedimentos de inferência que se processam de forma encadeada direta (*forward chaining*) ou reversa (*backward chaining*).

No modelo de encadeamento reverso, os procedimentos de inferência dão-se de forma inversa. O sistema parte de uma hipótese sobre a solução de um problema, podendo ser inclusive oriunda do próprio usuário, e inicia uma pesquisa pelas informações por meio das regras e fatos da base de conhecimento, procurando provar se aquela hipótese é a mais adequada solução para o problema analisado.

Na forma de encadeamento direto, as informações são fornecidas ao sistema pelo usuário que, com suas respostas, estimulam o desencadeamento do processo de busca, navegando através da base de conhecimento, procurando pelos fatos, regras e heurísticas que melhor se aplicam a cada situação. O sistema continua nesta interação com o usuário, até encontrar a solução para o problema a ele submetido.

Cabe ressaltar que para toda regra disparada por um ou mais fatos ou objetos, podem ser determinadas uma ou mais ações resultantes. Um exemplo de ação é a criação de um novo fato na memória operacional ou a inclusão de uma propriedade de um objeto, assim como também se pode retirar um fato. Incluir ou retirar fatos da memória operacional tem como conseqüências a alteração da agenda e faz com que novas regras sejam ativadas pela máquina de inferência, assim como uma regra que já estava ativa será retirada caso o fato que a ativou é retirado da agenda.

No sistema SEVME foi utilizado o encadeamento direto. Seguindo o exemplo do item 3.2, onde o componente especial informado pelo projetista é o rolamento, uma das verificações de erro implementadas segue a execução encadeada direta. Um exemplo de regras implementadas para ilustrar este caso é apresentado a seguir:

Regra 1) Esta regra é disparada quando a máquina de inferência identifica o fato “rolamento especial”. A ação desta regra é criar na memória operacional, um novo fato: “determinar blindagem rolamento”.

Em função deste novo fato: “determinar blindagem rolamento”, duas novas regras auxiliares podem ser disparadas. Estas regras consideram não só este fato como também propriedades do objeto tampa. Estas são regras auxiliares pois não verificam a existência de um erro, apenas criam um fato novo que será usado na verificação. As propriedades avaliadas no objeto tampa são: “graxeira” e “anel interno”.

Regra 2) Esta regra é disparada caso o objeto tampa tenha a propriedade: “com graxeira” e “com anel interno”. A ação desta regra é criar o fato: “rolamento aberto”. O fato rolamento aberto é determinado para que a graxa possa passar e lubrificar rolamento.

Regra 3) Esta regra é disparada caso o objeto tampa tenha a propriedade: “sem graxeira” e “sem anel interno”. A ação desta regra é criar o fato: “rolamento fechado”. Neste caso, como a tampa é sem graxeira o rolamento não será relubrificado e portanto deve ser fechado, ou seja, blindado,

Regra 4) Esta regra é disparada ao encontrar um erro na blindagem do rolamento especial. Ou seja, quando a propriedade blindagem do objeto rolamento é diferente da blindagem anteriormente determinada pelas regras auxiliares 2 e 3.

As regras criadas para identificar um possível problema na blindagem do rolamento, usando a técnica de sistemas especialistas, são disparadas pela presença de um determinado fato o qual pode gerar novos fatos e assim sucessivamente disparar novas regras. Isto significa que se um fato não existir simplesmente a regra não é disparada e por outro lado diferentes origens podem levar ao mesmo fato e desta forma uma regra é disparada independente da origem deste fato.

Em linguagem procedural teria que ser escrito um código seqüencial com uma série de “if...then...” (se...então) para cada possibilidade e assim chegar à conclusão de que existe algum erro. Se acaso uma nova condição de erro surgir então um novo trecho de código deverá ser escrito.

O que se quer enfatizar é a flexibilidade que se tem no uso de sistemas especialistas em soluções ou problemas que não tem um caminho fixo a ser seguido.

Há alguns cuidados que devem ser observados na utilização de regras:

- **Possível ineficiência:** durante cada ciclo de execução a máquina de inferência verifica cada regra na base do conhecimento, demandando tempo de execução;
- **Encadeamento infinito:** caso a própria regra crie uma consequência que gera condição para outra regra, que por sua vez retorna a regra inicial, o programa pode entrar em ciclos contínuos entre tais regras (*loopings*) e não avançar.
- **Opacidade:** é difícil prever o comportamento do *software*, mesmo analisando a base de conhecimento. A divisão do conhecimento em pequenos pacotes torna cada regra fácil de entender, mas de modo geral o *software* apresenta dificuldade em determinar que ações ocorrem. Conforme Alves (2001), a dificuldade em compreender o fluxo de informações em um sistema especialista pode ser contornada em algumas situações separando as regras em grupos;

- **Amplitude do conhecimento:** muitos domínios possuem diversas variações de entrada que necessitam de uma base do conhecimento contendo milhares de regras, tornando seu desenvolvimento complexo;
- **Adição de novo conhecimento contraditório com outro já existente;**
- **Adição de conhecimento que modifique as regras existentes;**
- **Conflito de regras:** os fatos podem satisfazer premissas de várias regras simultaneamente. Passos (2005) comenta que, conflitos de regras podem ser resolvidos pela declaração de saliência de regras, regras de controle e orientação a objeto .

3.3.4 Módulo de aquisição do conhecimento

Usado como um meio de o usuário inserir conhecimento no sistema ao invés do engenheiro do conhecimento explicitamente codificá-lo na base do conhecimento. Em muitos sistemas, este módulo é opcional. Geralmente as regras adicionadas pelo engenheiro do conhecimento são mais complexas que as regras de indução. Este módulo não foi implementado no sistema SEVME pois foi considerado que para o protótipo não era necessário e também não se analisou sua viabilidade.

3.3.5 Módulo de explanação

Este módulo é uma parte ou função do sistema, que explica as razões das respostas e conclusões do sistema ao usuário. O módulo de explanação permite ao usuário saber quais foram os passos seguidos pelo sistema para chegar a um resultado. Este recurso é imprescindível para justificar a resposta e serve para o engenheiro do conhecimento e o especialista julgarem se o sistema está atendendo ao que foi planejado (ELISEI e OSTELLINO, 2003).

Conforme Elisei e Ostellino (2003), a base do conhecimento contém o conhecimento heurístico fornecido pelos especialistas além do obtido em livros e publicações. Isso ratifica a importância dos diferentes tipos de conhecimento propostos por Gonzalez e Dankel (1993) na construção da base do conhecimento.

Como resultado da verificação de erros, um dos pontos fundamentais no desenvolvimento do sistema SEVME foi o de explicar quais informações o sistema considerou para determinar a existência de cada problema o qual pudesse diagnosticar.

3.3.6 Interface com o usuário

Segundo Chorafas (1990), "o computador interage com as perguntas do usuário e chega a uma conclusão baseada nas respostas". Para tal é necessário existir uma interface, a qual segundo Gonzales e Dankel (1993), fornece ao usuário um meio amigável de comunicação com o programa inteligente. Ela faz isto com o uso de menus, linguagem natural e visualização gráfica e pode ser utilizada para:

- Possibilitar ao sistema fazer perguntas ao usuário;
- Fornecer explicações sobre o porquê de o sistema estar fazendo determinadas perguntas;
- Possibilitar ao usuário questionar o sistema a respeito das conclusões fornecidas;
- Visualizar os resultados obtidos;
- Permitir ao usuário gravar ou imprimir resultados.

O usuário pode, caso o sistema esteja capacitado, perguntar ao sistema por que este requer certa informação. O SE deve explicar a necessidade dos dados e como estes serão utilizados. O mais importante é a capacidade do SE em prover explicações, ou seja, o SE dizer como chegou a suas conclusões; não somente explicar, mas também justificar a opinião que oferece. A interação entre usuário e sistema ocorre na forma de perguntas e através das respostas a estas perguntas chega a uma conclusão.

Neste trabalho, o processo interativo de perguntas e respostas executado através da interface é um importante tema de discussão, pois conforme será apresentado no capítulo seguinte, no sistema SEVME este foi simplificado. A simplificação se refere ao fato de as respostas às perguntas que normalmente são feitas de forma a permitir ao usuário poder interagir com o sistema, neste desenvolvimento puderam ser extraídas através de uma interface com os sistemas existentes na empresa alvo. No próximo capítulo se justifica esta opção de simplificação e a forma adotada e que possibilitou o desenvolvimento, além de facilitar e reduzir o tempo de resposta do sistema.

3.3.7 Base de conhecimento, regras e controle de execução

Para Bittencourt (1998) apud Alves (2001), representação do conhecimento é uma combinação de estruturas e de procedimentos de interpretação que, se

utilizados da maneira correta dentro de um programa, levarão a um comportamento que simule o conhecimento dos seres humanos.

Em linhas gerais a representação do conhecimento é a aplicação de técnicas para descrever objetos e fatos do mundo, suas interações e a forma como podem ser úteis para a resolução de problemas (PASSOS, 2005).

As principais técnicas utilizadas na representação do conhecimento são regras, redes semânticas e orientação a objeto. Conforme Passos (2005), há uma tendência à representação híbrida do conhecimento, ou seja, a utilização de mais de uma técnica.

Regras são estruturas que relacionam informações através da máquina ou mecanismo de inferência. A utilização de regras tem vantagens como:

- **Modularidade:** cada regra é uma unidade distinta do conhecimento representado e pode ser adicionada, modificada ou removida, garantindo flexibilidade na implementação e expansão gradativa da base do conhecimento;
- **Uniformidade:** o conhecimento é expresso na mesma forma e facilita o desenvolvimento do *software*. Alves (2001) cita que as regras são uniformes pois normalmente são escritas num padrão, na forma de pares de expressão consistindo de uma condição e uma ação;
- **Naturalidade:** as regras têm o formato natural para se expressar o conhecimento em cada domínio. Os especialistas geralmente pensam desta forma.

A Naturalidade foi comprovada durante a fase de aquisição de dados, na qual o especialista usou naturalmente a forma **if...then... (se...então...)** ao explicar o exemplo apresentado no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Exemplo de aquisição de dados e forma de pensamento do especialista.

1) "**SE** o rolamento é especial **ENTÃO** tenho que ver se a blindagem está correta em relação ao tipo de lubrificação definido."

2) "Neste caso, **SE** a tampa dianteira é com graxeira e **SE** a tampa tem anel interno de fixação do rolamento, **ENTÃO** o rolamento deve ser aberto."

3) "Depois disto é só verificar **SE** o rolamento especial indicado para uso tem ou não blindagem. Se o rolamento é fechado "

De modo geral, todo e qualquer *software* utilizará, em alguma etapa, a representação através de regras. Silva (1998) explica que somente o uso de técnicas de representação através de regras não é suficientemente poderoso para formular e resolver problemas complexos de engenharia, principalmente porque somente regras não são capazes de representar eficientemente entidades complexas, especialmente quando estas entidades possuem diversos atributos e procedimento agregados.

No sistema especialista protótipo cada regra verifica possíveis erros relacionados com no mínimo dois componentes. O início da análise é sempre com base no componente especial da estrutura de produto do motor, entretanto em grande parte dos casos pode-se ter mais de dois componentes especiais para o mesmo produto. Isto significa que mais casos são verificados e mais atributos e dados são necessários para a análise. No protótipo SEVME as regras foram implementadas em conjunto a objetos e suas propriedades e métodos.

O processo de execução e ativação de regras em sistemas especialistas difere de um sistema procedural e não ocorre de forma seqüencial com um caminho fixo determinado pelo desenvolvedor do sistema. Silva (1998) explica que por outro lado, o ponto chave de programação não procedural é o programador ter que especificar qual é o objetivo e deixar o sistema determinar como atingi-lo. Devido a esta propriedade, um dos pontos chaves em construir um sistema especialista é definir como o controle do fluxo de informação será codificado no sistema (Silva, 1998).

Assim como apresentado por Silva (1998) em sua tese, também no desenvolvimento do sistema SEVME utilizou-se, entre outros métodos possíveis, a abordagem que sugere controlar as fases de execução do sistema pelo uso de um Fato de Controle (**Control Pattern**) definido por Giarratano & Riley (1994).

A Figura 3.2 mostra o exemplo adaptado de Silva (1998) para a estrutura de uma regra de controle central da execução de cada fase.

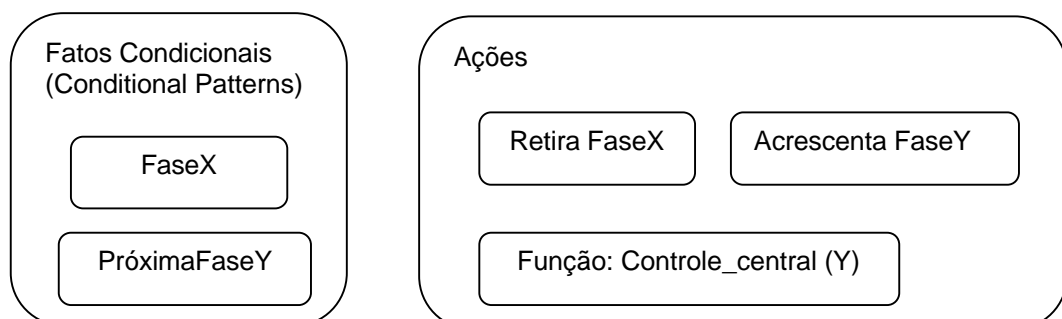


Figura 3.2 – Estrutura da regra de controle central

A execução do sistema SEVME foi dividida em 3 fases principais:

- Fase 1: Aquisição dos dados
- Fase 2: Verificação de erros
- Fase 3: Geração dos dados e arquivo de saída em formato “.html”

Além da estrutura de controle definida na Figura 3.2, outros fatos pré-definidos pelo CLIPS no início da execução podem ser utilizados. Um destes fatos é denominado Fato Inicial (Initial fact) o qual no sistema protótipo foi utilizado para a execução da fase 1, sendo as fases 2 e 3 executadas segundo os fatos controlados pela regra de controle central.

3.4 Modelos de desenvolvimento de um Sistema Especialista

Uma das maiores diferenças entre engenharia de conhecimento e engenharia de *software* está no tipo de conhecimento a ser representado. Enquanto engenharia de *software* utiliza conhecimento e procedimentos algoritmos bem definidos, a engenharia de conhecimento envolve a representação de conhecimento heurístico extensivo, impreciso e indefinido, obtido da mente de especialistas.

Um dos autores, Waterman (1986) propõe o processo de desenvolvimento de sistemas especialistas, conforme figura 3.3:

Este processo é apresentado e discutido por Silva (1998) na TESE “Expert System Prototype For Hydraulic System Design Focusing On Concurrent Engineering Aspects”.

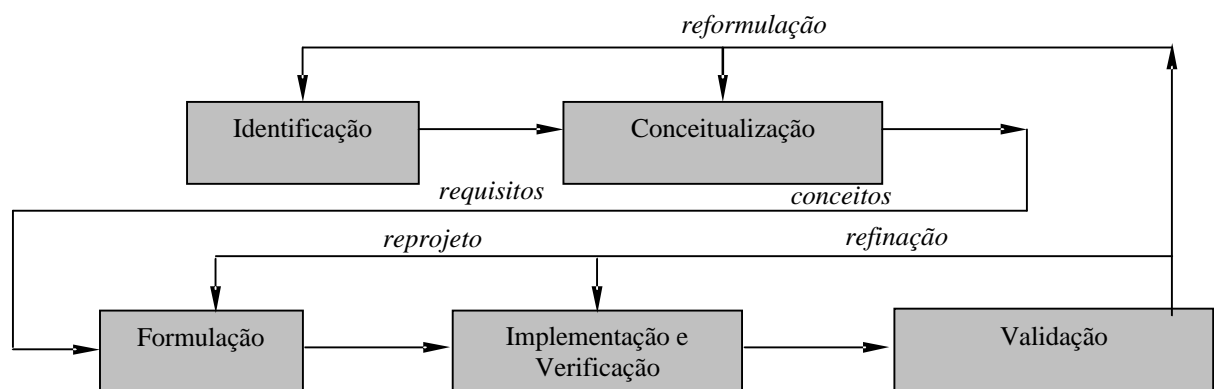


Figura 3.3 - Processo de desenvolvimento de sistemas especialistas, segundo WATERMAN (1986).

A tabela 3.1, adaptada de Silva (1998), resume as principais etapas propostas por Waterman (1986) a serem trabalhadas no desenvolvimento do protótipo.

Entendendo estas etapas percebe-se que este processo pode não ter um fim definido e portanto acaba naturalmente se tornando um processo de desenvolvimento incremental.

Tabela 3.1 - Principais etapas no desenvolvimento de SE, adaptado de Silva (1998).

Etapa	Definições
1. Identificação	Tipo e escopo do problema, escolha dos especialistas, recursos necessários e objetivos do sistema.
2. Conceitualização	Engenheiro do conhecimento e especialistas decidem os conceitos, relações, estratégias, sub-tarefas necessários para a resolução de problemas neste domínio específico.
3. Formulação	Conceitos chave e relacionamentos de acordo com a estrutura e tipo de implementação utilizada. Nesta fase as técnicas de aquisição e representação são fundamentais.
4. Implementação	Codificar o programa, envolvendo as técnicas de representação, integrando conhecimento de diferentes fontes.
5. Validação	Teste de desempenho e utilização do programa. Os especialistas avaliam o protótipo e fornecem subsídios para sua melhoria. Esta fase pode revelar erros na representação do conhecimento e ,conseqüentemente, necessitar de refinamento, reprojeção ou reformulação de fases anteriores.

O processo descrito ocorreu durante o desenvolvimento do sistema especialista SEVME na empresa alvo, no qual novos casos eram encaminhados para implementação no sistema por iniciativa dos próprios usuários e especialistas do sistema. Um exemplo de solicitação registrada por correio eletrônico (*e-mail*) do EC é apresentado:

“Caro colega, dando continuidade ao nosso programa de melhoria, aconteceram dois casos, que a fábrica reclamou a falta do furo M3, utilizado para fixar a ponte retificadora ou a proteção térmica e resistência de aquecimento.

Exemplo é o item 020829545 sac 21609.

É possível nós colocarmos algum tipo de controle neste caso. Esta rosca somente é utilizada nestes casos.

Obrigado.

Jaimor Perito”

3.4.1 O modelo desenvolvimento incremental

Na literatura encontram-se vários modelos para uso no desenvolvimento de sistemas. A decisão correta tomada no estágio inicial de desenvolvimento é de fundamental importância. Dependendo desta escolha, todo o projeto terá mais chance de sucesso.

Algumas dificuldades inicialmente desconhecidas, podem levar o engenheiro de conhecimento a descobrir, no meio do processo de desenvolvimento, que a estrutura de representação de conhecimento utilizada é inadequada. Para superar estes obstáculos e fornecer à equipe de desenvolvimento uma boa noção de profundidade do conhecimento requerido, utiliza-se no desenvolvimento de sistemas especialistas uma técnica conhecida como desenvolvimento incremental. Gonzales e Dankel (1993) definem desenvolvimento incremental como o processo iterativo de aquisição, representação e confirmação de conhecimento em uma parte limitada do domínio do problema com o objetivo de construir de forma incremental a base de conhecimento do sistema especialista.

Cada fase deste modelo incremental incorpora atividades a serem seguidas, tais como: análise prévia de viabilidade, especificações do protótipo, aquisição do conhecimento, representação e verificação do conhecimento, implementação e validação. Estas etapas compõem o processo de desenvolvimento dos sistemas especialistas apresentado em detalhes por Passos (2005). A metodologia incremental não é novidade no universo do desenvolvimento dos sistemas especialistas, pois, é bastante presente e seguida por quase a totalidade dos profissionais que constroem sistemas especialistas.

3.4.2 Riscos e atividades no desenvolvimento de Sistemas Especialistas

Como todo e qualquer projeto, o desenvolvimento de um sistema especialista deve ser organizado e gerenciado, estando sujeito a riscos em todas as fases de sua execução. Os maiores riscos são aqueles que o Engenheiro do Conhecimento não pode administrar diretamente.

A tabela 3.2 identifica as quatro principais atividades dentro do desenvolvimento de um *software* de sistemas especialistas, descrevendo-as sucintamente e analisando seus riscos e alternativas possíveis aos mesmos.

Tabela 3.2 - Análise de risco das principais atividades no desenvolvimento de um *software* de sistema especialista.

Atividade	Descrição	Riscos	Alternativas
Aquisição do conhecimento com os especialistas	Através de entrevistas orientadas, capturar o conhecimento prático dos especialistas.	<ul style="list-style-type: none"> - indisponibilidade do especialista; - improdutividade do especialista; - técnicas e procedimentos inadequados para extração do conhecimento. 	<ul style="list-style-type: none"> - utilizar mais de um especialista para atuar nos casos de indisponibilidade ou improdutividade do outro especialista; - pesquisar outras técnicas de extração do conhecimento; - utilizar o conhecimento do próprio Engenheiro do Conhecimento.
Implementação do conhecimento	Representar o conhecimento adquirido dos especialistas no <i>software</i> . Envolve apenas o Engenheiro do Conhecimento.	<ul style="list-style-type: none"> - representação incorreta; - dificuldades no uso do <i>software</i>. 	<ul style="list-style-type: none"> - pesquisar técnicas de representação adequadas ao problema em estudo; - capacitar-se no uso do <i>software</i> com auxílio do orientador; - pesquisar outros usuários do <i>software</i> para discussão.
Verificação da base do conhecimento	Consiste no Engenheiro do Conhecimento revisar erros de digitação e erros de compreensão do conhecimento implementado no <i>software</i> .	<ul style="list-style-type: none"> - erros de sintaxe (digitação); - erros de semântica (compreensão do conhecimento); - erros grosseiros do <i>software</i>. 	<ul style="list-style-type: none"> - revisar o programa e corrigir os erros identificados; - revisar o programa e verificar se há erros em outras partes.
Validação do <i>software</i>	Submeter o <i>software</i> a avaliação dos especialistas e outros potenciais usuários.	<ul style="list-style-type: none"> - avaliação negativa de algumas etapas do <i>software</i>; - reclamação sobre a interface entre usuário/sistema. 	<ul style="list-style-type: none"> - reavaliar as etapas do <i>software</i> com base na avaliação; - estudar a utilização de uma interface mais amigável.

Da análise dos riscos conforme a Tabela 3.2 verifica-se que mesmo que a área de aplicação viabilize a utilização de um *software* tipo sistema especialista, deve haver disponibilidade de recursos para que o Engenheiro do Conhecimento realize sua tarefa para minimizar quaisquer riscos na atividade de aquisição do conhecimento. Para evitar os riscos, três projetistas com longa experiência no setor

como verificadores de projeto são os especialistas, sendo um dos principais participando continuamente e outro utilizado principalmente na fase de validação.

Os especialistas compreenderam a idéia central do desenvolvimento deste trabalho, ou seja, auxiliar o ser humano em suas tarefas e não substituí-lo. Por sentirem a real necessidade de uma ferramenta como esta, até mesmo para auxiliá-los nas tarefas diárias, se prontificaram a participar integralmente das atividades necessários.

É fundamental para a qualidade do protótipo que o especialista seja verdadeiramente um especialista no domínio em questão. Ambos especialistas que participaram do processo possuem muito conhecimento e vivência na área de projeto de produtos da empresa alvo. Há onze anos convivem com o Engenheiro do Conhecimento e o fato de estarem fisicamente próximos facilitou o processo de desenvolvimento incremental.

Dos riscos apresentados na Tabela 3.2 os mais presentes no desenvolvimento do sistema SEVME ocorreram nas atividades de implementação do conhecimento e verificação da base de conhecimento.

Neste desenvolvimento não foram sentidos os problemas normalmente registrados no desenvolvimento de sistemas especialistas como por exemplo a dificuldade de dar uma continuidade no processo de aquisição, representação, implementação e verificação e por fim a validação do sistema.

A dificuldade foi percebida na implementação e deu-se pela pouca experiência do E.C. sendo gradualmente diminuída ao decorrer do projeto. Já a verificação da base de conhecimento tornou-se a cada novo caso implementado mais criteriosa dadas as possibilidades de ocorrer mais de um caso de erro no mesmo projeto e da possibilidade de ao implementar uma nova regra estar gerando erros de semântica e sintaxe.

Felizmente com o auxílio e disponibilidade do E.H. foi possível através da criação proposital de erros comprovar a eficácia e testar o sistema a cada novo caso implementado. A criação proposital consiste na alteração temporária de dados reais no sistema de origem (onde os dados são coletados, extraídos) criando situações que na prática facilmente poderiam ocorrer.

3.4.3 Aquisição e Organização do Conhecimento

Durante a fase de aquisição de dados a solução do problema é encontrada através de um processo iterativo e repetitivo de perguntas e respostas, estruturadas ou não, entre EH e EC. Em um processo de desenvolvimento incremental, esta fase pode se tornar tão mais tranqüila quanto mais próximos estiverem o EH e o EC e quanto maior o conhecimento do EC no domínio em estudo.

No parágrafo anterior foi dito “a fase de aquisição de dados é ...” e não “a fase de aquisição do conhecimento é ...”. Isto porque, ainda que o objetivo seja adquirir conhecimento, o que se tem disponível em um primeiro momento não é o conhecimento e sim um conjunto de dados. Estes dados, uma vez trabalhados seguindo algumas etapas de separação de informações úteis, acabam por se transformar em conhecimento.

Estes conceitos são discutidos por Giarratano e Riley (1994) onde propõe uma hierarquia na formação do conhecimento conforme Figura 3.4.

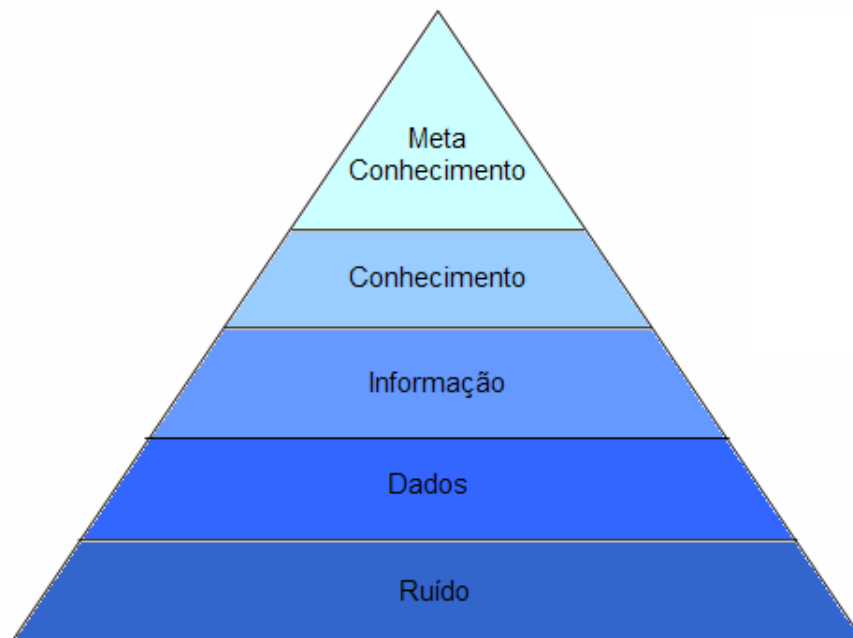


Figura 3.4- Hierarquia do conhecimento, adaptado de Giarratano e Riley (1994)

Os dados obtidos de entrevistas, observações, pesquisas bibliográficas ou quaisquer métodos que se utilize, são muitas vezes dados ruidosos, ou seja, não estão totalmente claros e são compostos por dados bons e dados ruins. Separar os dados bons de uma forma organizada é que gera a informação, ou seja, dados processados sobre os quais existe interesse.

O conhecimento, analisado por Giarratano e Riley (1994) segundo a Figura 3.4 pode ser descrito como sendo uma informação especializada e que utiliza ainda uma escala acima do conhecimento a qual chamaram de meta conhecimento, ou seja, conhecimento sobre o conhecimento. Para cada item da hierarquia são apresentados a seguir exemplos relacionados ao domínio em estudo.

Ruído: Item sem interesse. Exemplo: A graxa é importada.

Dado: Item de potencial interesse. Uma representação simbólica de um objeto ou informação do domínio sem considerações de contexto, significado ou aplicação. Exemplo: Rolamento.

Informação: Dados processados sobre os quais existe interesse. Reconhecimento dos objetos do domínio, suas características, suas restrições e seus relacionamentos com os outros objetos, sem ater-se a utilidade dessa informação. Exemplo: O Rolamento é blindado.

Conhecimento: Trata-se de uma informação especializada e base da construção de um sistema especialista. Exemplo: Rolamentos blindados não permitem a passagem de graxa.

Meta Conhecimento: É o conhecimento sobre o conhecimento, um nível de abstração onde se decide sobre qual conhecimento utilizar.

Exemplo: Em motores elétricos podem-se utilizar rolamentos blindados os quais não requerem relubrificação como também se podem utilizar rolamentos abertos com sistema de relubrificação no qual por pressão a graxa entra por um pino graxeiro, passa por canais até chegar ao rolamento e sai do outro lado expelindo o excesso e a graxa velha através do canal de saída.

3.4.4 Fase inicial de desenvolvimento do sistema SEVME

O processo teve início com um estudo de viabilidade e aplicabilidade dos conceitos de sistemas especialistas. Deste estudo foi comprovada a viabilidade e o apoio gerencial necessário, identificados os recursos disponíveis e mais adequados possíveis.

Identificados os especialistas da atividade de verificação de projeto de motores elétricos, fez-se uma apresentação de conceitos relacionados a sistemas especialistas com objetivo de expor aos especialistas humanos no que consiste o

trabalho, qual o papel do EC e do EH e como seria conduzida cada etapa do processo de desenvolvimento.

Com base em conhecimento prévio do EC, construiu-se um protótipo rápido para demonstrar a potencialidade da utilização de um sistema desta natureza e assim despertar interesse dos usuários em participar do processo. A apresentação do protótipo rápido, ao mesmo tempo em que despertou interesse e permitiu aos usuários ter uma noção de possíveis benefícios, gerou certa inquietude. Esta impressão não foi abertamente colocada, mas em função das perguntas iniciais dos especialistas, tornou-se perceptível ao EC certa insegurança por parte dos EH. Esta inquietude, gerada pela sensação de estar saindo da zona de conforto, é percebida sempre que o usuário detecta que seu conhecimento está saindo de seu domínio. Com os devidos esclarecimentos, os especialistas entenderam que o sistema não os estaria substituindo, e com base nos objetivos colocados para o protótipo na introdução deste trabalho, os usuários são apenas beneficiados pelo uso e aprimoramento contínuos do sistema.

Vencida a etapa de transferência do conhecimento básico necessário aos especialistas, iniciou-se a fase de aquisição do conhecimento. Para NORDLANDER (2001) a fase de aquisição do conhecimento não somente clona e representa o conhecimento do especialista no *software*, mas também insere sua intuição e o modo como as melhores opções podem ser selecionadas sob um conjunto de circunstâncias.

Na atividade de projetar o produto, o projetista inicia seu trabalho utilizando como referência uma lista de componentes padronizados para linha do produto com o qual está trabalhando. Da análise dos requisitos do cliente, ocorre a necessidade de efetuar adaptações com objetivo de satisfazer necessidades dos clientes que divergem do produto padronizado utilizado como referência. Estas adaptações se traduzem efetivamente na inserção, substituição ou exclusão de componentes da lista original, gerada pelo sistema PDM, que lhe serviu de referência. Para estas adaptações será utilizado no texto o termo manipular componentes ou a lista destes.

Relacionado às conseqüências da manipulação da lista de componentes é que se baseia o protótipo, para o qual foram especificadas como principais saídas e que foram definidas no capítulo 1 como os objetivos do protótipo:

- Apontar divergências ou inconsistências entre componentes, de forma similar o resultado que seria gerado pelo projetista;

- Explicar a origem da divergência e como esta foi detectada.

Conforme apresentado no próximo capítulo, durante a análise de algumas regras implementadas, muitos dos problemas podem ter sua origem na qualidade dos dados existentes nos sistemas utilizados pelo projetista. Da qualidade destes dados surgiu outro potencial benefício e conseqüentemente uma informação de saída para o protótipo:

- Identificar problemas de cadastro nas informações no banco de dados da empresa;

Conforme comentado a pouco, manipulação da lista de componentes é o ponto de partida do sistema protótipo. Para adquirir e representar o conhecimento dos especialistas e entender como estes procedem no processo de verificação e identificação de erros decorrentes dos componentes manipulados, foram realizadas entrevistas junto aos especialistas, com objetivo de acompanhar a linha de raciocínio utilizada para se chegar a conclusão da existência ou não de algum problema.

Um usuário inexperiente, certamente teria que analisar cada um dos componentes envolvidos no projeto e para cada um verificar as relações que este tem com seus componentes adjacentes e comparar suas características até encontrar alguma inconsistência ou visualizar desenho a desenho dos mesmos.

O usuário especialista, por seu conhecimento, já sabe por experiência adquirida que este procedimento é demasiadamente demorado e desnecessário. O caminho mais curto, segundo os especialistas, é partir dos componentes que foram manipulados, que estão identificados no sistema (base de dados) utilizado pela empresa, e somente então confrontar as características destes componentes com os seus adjacentes, como também com as especificações do cliente. Considerando que todo componente tem vários atributos, a verificação de cada um deles ainda assim se tornaria demorada.

Estas e todas as demais informações obtidas no processo de aquisição ocorreram num processo de entrevistas com perguntas pré-definidas e outras informais elaboradas pelo EC e direcionadas ao EH ocorreu em um processo interativo até se chegar nas informações necessárias para representação do

conhecimento. O Quadro 3.4 apresenta um exemplo das respostas obtidas no processo de aquisição realizado através de entrevistas com o especialista.

Quadro 3.4 Questionamentos iniciais para aquisição de conhecimento – parte 1

Questionamentos iniciais feitos ao E.H – parte 1
<i>Pergunta : Como identificar potenciais erros no projeto ?</i>
Resposta: Os erros são identificados por comparação visual entre as especificações especiais do motor e características e dimensões dos componentes utilizados.
<i>Pergunta : Os dados utilizados na comparação estão disponíveis em algum sistema ou banco de dados?</i>
Resposta: Sim, a maioria está disponível no sistema PDM. No PDM temos disponíveis: <ul style="list-style-type: none"> - A lista dos componentes padrões e especiais - As características padrões do motor - As características e dimensões dos componentes normais e especiais
<i>Pergunta: Os dados disponíveis são confiáveis ?</i>
Resposta: Nem sempre. Muitos componentes não possuem os dados cadastrados ou estes estão errados ou incorretos.
<i>Pergunta : Os dados que estão disponíveis são facilmente acessíveis ?</i>
Resposta: Estão disponíveis no banco de dados Oracle do sistema PDM.
<i>Pergunta: Como poderíamos classificar os erros de projeto ?</i>
Resposta: Componentes incorretos, falta ou excesso de componentes.
<i>Pergunta: Podemos identificar estes erros utilizando os dados disponíveis no sistema PDM ?</i>
Resposta: Sim, podemos comparar os dimensionais, as características e a lista de componentes nas seguintes situações: <ul style="list-style-type: none"> - Comparando os dimensionais dos componentes que se relacionam - Comparando os dimensionais com as especificações especiais do projeto - Comparando as características dos componentes com as especificações especiais do motor
<i>Pergunta: Quais são os principais erros que devem ser analisados pelo protótipo SEVME?</i>
Resposta: Os erros principais são... (conforme Tabela 3.3)

Deste processo gerou-se a da Tabela 3.3 com alguns dos principais casos a ser implementados no sistema SEVME. Além destes outros foram relacionados e destes definidos os principais erros a ser trabalhados e implementados. Com os especialistas foram identificados e priorizados os problemas mais frequentes ou os mais graves. Os erros graves são erros que não puderam ser detectados em

nenhuma das fases de desenvolvimento e tiveram conseqüências para o cliente e para a empresa. Erros desta natureza podem não se repetir, mas como medida preventiva optou-se por implementá-los no sistema protótipo nos casos em que os dados de entrada necessários para análise encontravam-se nos sistemas da empresa alvo.

A partir da lista de erros, seguiu-se com um processo de entrevistas para cada um dos erros da tabela. Um exemplo é apresentado no Quadro 3.5 para o erro número 7 da Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Principais erros identificados como candidatos a implementação no SEVME.

Erros candidatos à implementação
1. Sistema de lubrificação incompatível
2. Blindagem do rolamento errada
3. Assento do rolamento com interferência fora da tolerância
4. Assento do rotor com dimensão de outra carcaça
5. Assento do ventilador fora do campo de tolerância permitido
6. Encosto rolamento
7. Medida prensagem incorreta

Para cada erro seguiram-se as etapas definidas na Tabela 3.2. Uma vez, adquirido e representado o conhecimento, iniciava-se o processo de implementação e verificação. A verificação do código implementado foi executada pelo EC utilizando exemplos simulados nos quais dados errados eram definidos propositalmente para forçar a identificação do erro, assim como se executava a verificação com dados corretos.

À medida que o sistema evoluiu os testes se tornam mais complexos, dada a possibilidade de se detectar mais de um erro na mesma verificação. Nesta situação há que se ter cuidado e executar testes com objetivo de detectar regras conflitantes. Neste sentido, conforme é apresentado no próximo capítulo definiu-se regras de controle e uma estratégia a ser utilizada pelo CLIPS para resolução de eventuais conflitos.

O Quadro 3.5 apresenta a continuação das primeiras entrevistas realizadas com o especialista.

Quadro 3.5- Questionamentos para aquisição de conhecimento – parte 2

Questionamentos iniciais feitos ao E.H – parte 2
<i>Pergunta: O erro de medida de prensagem é sempre um provável erro avaliado na verificação?</i>
Resposta: Não, somente em algumas situações.
<i>Pergunta: Quais seriam estas situações ou como podemos obter esta informação ?</i>
Resposta: É só verificar os componentes que estão envolvidos no cálculo da medida de prensagem. Se algum deles tiver sido modificado ou é especial, então a medida de prensagem deve ser calculada.
<i>Pergunta: Quais são os componentes e dados necessários para identificar o erro de medida de prensagem?</i>
Resposta: Componentes envolvidos: <ul style="list-style-type: none"> - Rotor completo, tampa dianteira, desenho do estator completo Dados necessários : <ul style="list-style-type: none"> - MP1: Medida de Prensagem e CP: Comprimento do Pacote (rotor completo) - PE: Profundidade do Encaixe do rolamento (tampa dianteira) - CE: Comprimento entre Encaixe das tampas (desenho estator completo)
<i>Pergunta: Como identificar o erro na medida de prensagem do rotor completo ?</i>
Resposta: - Calcula-se a medida de prensagem MP2 com base nas dimensões dos componentes. <ul style="list-style-type: none"> - Compara-se o resultado do cálculo com o valor da medida de prensagem (MP1) especificado no componente rotor Completo. - A fórmula para calcular MP2 é: $MP2 = [(CE-CP) / 2] + PE$ <i>Qualquer diferença entre MP2 e MP1 implica em erro de projeto.</i>

Para a representação do conhecimento adquirido ao longo das entrevistas, foram definidos os componentes envolvidos e suas informações com os quais foram definidas as classes e suas propriedades e métodos. Os detalhes do processo de representação são apresentados no próximo capítulo.

3.5 Resumo do capítulo

O presente capítulo apresentou aspectos da história da inteligência artificial, suas definições e objetivos de criar máquinas cujo comportamento pudesse ser comparado ao de um humano. Desta forma a inteligência artificial se relaciona com os sistemas especialistas, que são *softwares* nos quais especialistas descrevem suas habilidades, conhecimento prático e modo de raciocínio para encontrar soluções de maneira rápida, relacionando diversos fatores e propondo soluções, mesmo no caso de falta de informação.

A inteligência artificial não pretende eliminar o ser humano de sua tarefa ou fazer com que computadores os substituam. Objetiva preservar o conhecimento e dispô-lo com maior acesso para novos profissionais, acelerar seu treinamento, levar o conhecimento especializado em locais inacessíveis ao especialista humano, entre outras vantagens. Assim a inteligência artificial vem, através dos sistemas especialistas, conquistando maior número de aplicações, muitas vezes sutis e imperceptíveis em nosso dia-a-dia.

O capítulo apresentou os conceitos relativos a sistemas especialistas e seus elementos, o papel do EH e do EC, as etapas e riscos do processo de desenvolvimento, o modelo de desenvolvimento incremental e a fase aquisição do conhecimento na qual são utilizados conceitos relacionados à hierarquia do conhecimento e para os quais apresentaram-se exemplos relacionados ao domínio em estudo.

O capítulo 4 apresenta a fase de representação do conhecimento, a estrutura do sistema e suas classes e regras, além de aspectos deste trabalho relacionado à proposição de formas alternativas, diferentes da forma normalmente adotada onde ocorre grande interação entre o usuário e o sistema, para a obtenção dos dados de entrada. A forma e os dados de saída gerados são também apresentados ao final do próximo capítulo.

CAPÍTULO IV

DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA ESPECIALISTA PROTÓTIPO- SEVME

O desenvolvimento de um sistema especialista é dividido em etapas, algumas envolvendo apenas o engenheiro do conhecimento, outras os especialistas e finalmente os usuários do sistema. A comunicação e colaboração entre estes elementos são fundamentais para o sucesso do projeto.

No capítulo 3 foram apresentados conceitos sobre inteligência artificial, sistemas especialistas e seus elementos, o uso de regras de controle, além de detalhes da fase de aquisição de acordo com o modelo de desenvolvimento incremental adotado.

Este capítulo apresenta a estrutura geral e as interfaces de comunicação desenvolvidas, a estrutura de classes relacionadas aos objetos e a interface para obtenção de dados de entrada.

A análise dos dados de saída, a apresentação de casos reais e detalhes do processo de verificação das regras implementadas e da etapa validação final são também apresentados.

4.1 Estrutura geral e interfaces de comunicação

Uma das premissas adotadas no desenvolvimento do protótipo é a informação de que os usuários finais do sistema, pertencentes ao Departamento de Engenharia do Produto da empresa alvo, estão familiarizados aos termos técnicos utilizados nas interfaces do sistema e cujo domínio do conhecimento está baseado no projeto de um motor elétrico.

Para um sistema especialista, assim como para maioria dos sistemas de *software*, espera-se que este seja útil aos seus usuários, de fácil execução, com interface amigável e funcional. Esta tarefa cabe ao desenvolvedor do sistema, o qual

neste caso é o próprio engenheiro do conhecimento. Por ser um colaborador (funcionário) da empresa alvo, o EC não teve dificuldade em formalizar o conhecimento no domínio como ocorre quando o engenheiro do conhecimento não é especialista na área de aplicação do sistema. O fato de o EC estar familiarizado com as tarefas realizadas na atividade de verificação da estrutura do produto, permitiu que este trabalho fosse realizado sem um especialista com amplo conhecimento no domínio considerado.

Para entender se o sistema tem potencial para se tornar útil, é necessário conhecer quais são as saídas desejadas e quais são possíveis de ser implementadas. Além disto, necessita-se conhecer o processo no qual estará inserido o sistema, quais as informações estão disponíveis e como o usuário processa tais informações.

Conforme exposto no capítulo 3, a comunicação entre o sistema e o usuário ocorre via um processo interativo. No desenvolvimento do protótipo SEVME este processo interativo foi bastante simplificado e as respostas às perguntas foram obtidas dos dados existentes nos sistemas de informação apresentados no capítulo 2. A sistemática utilizada para entrada dos dados utilizados como resposta às perguntas é apresentada no item 4.1.1. Independente da forma adotada para a solução do problema necessita-se de dados de entrada para ao final gerar os resultados de saída obtidos pela execução da máquina de inferência do sistema.

4.1.1 Interface para entrada de dados

Dependendo do problema, dos dados de entrada para o caso em análise e do nível de conhecimento no domínio por parte do usuário que irá operar o sistema, um problema pode ser originado por múltiplas causas e um elevado número de perguntas pode ser necessário para uma completa análise do sistema. Um grande volume de perguntas pode tornar o sistema demorado ou gerar desconforto e desinteresse por parte do usuário em utilizar o sistema. A performance é sempre um ponto fundamental para o sucesso da implantação de um novo sistema.

Por outro lado os dados de entrada são fundamentais para qualidade dos resultados de saída gerados. No caso do protótipo SEVME o ponto de partida para análise pode ser mais de um componente especial, perguntas iguais podem ser

necessárias para diagnosticar problemas com diferentes origens, crescendo proporcionalmente ao número de componentes especiais e da quantidade de casos de verificação de erro que forem implementados no sistema.

Desta forma, em função do exposto e da necessidade de tornar o sistema o mais ágil, rápido, eficiente e imparcial em relação ao conhecimento do usuário que estiver operando o sistema, foi avaliado para este trabalho a possibilidade de se alterar a forma tradicional de entrada dos dados por uma forma automática de obtenção destes dados.

A forma tradicional prevê a entrada dos dados através de um processo interativo onde o usuário responde as perguntas executadas pelo sistema. No processo automático propõe-se que esta aquisição seja executada por um *software* externo o qual deve prover, de forma padronizada e pré-estabelecida, a resposta ou os dados usados para chegar até as respostas, necessários às perguntas do sistema e que serão utilizadas nas inferências executadas pelo protótipo.

Um sistema operado por um usuário com certo nível de conhecimento e domínio da área pode minimizar o volume de explicações e informações de ajuda que o sistema especialista tem que fornecer para que o usuário possa responder a cada nova pergunta e assim dar prosseguimento na análise do sistema.

É fato que para os casos que se propõe diagnosticar com o uso do protótipo a resposta às perguntas realmente existe na base de dados dos sistemas da empresa alvo. O uso de entrada de dados automática permite que mesmo usuários iniciantes na atividade de projeto possam executar o sistema. Cabe neste caso ao EC definir juntamente ao EH o nível da informação e volume de detalhes necessários para gerar a explicação para cada caso ao qual o sistema se propõe analisar.

A opção de substituir a entrada de dados normal pela automática só foi possível após avaliar se as respostas às perguntas que o sistema deve realizar estão disponíveis na base de dados de informações da empresa.

Os dados de entrada necessários para ativar as regras foram identificados e para cada informação necessária determinada sua origem na base de dados atual da empresa. Verificou-se que os dados possuíam local definido e geralmente com valor definido, porém não estavam todos devidamente cadastrados, ou por não terem sido informados pelo usuário no momento de seu cadastro ou pela introdução equivocada de informações. Este cenário é típico e ocorre com a maioria dos

sistemas especialistas, que acabam trabalhando com informações muitas vezes incompletas e até incorretas.

Surgiu após esta análise, como sugestão do EH, a utilização do protótipo também como ferramenta para “identificar problemas de cadastro de informações na base de dados da empresa”. Este caso conforme citado no item 1.4 do capítulo 1 o qual resume os resultados esperados, é um dos benefícios indiretos deste trabalho.

Confirmada a existência e possibilidade de extrair as informações do banco de dados da empresa e ainda utilizar o protótipo para melhorar a qualidade dos dados, o trabalho foi então direcionado de forma a considerar: para toda nova regra a ser implementada, que os dados de entrada necessários fossem possíveis de ser adquiridos automaticamente e transferidos eletronicamente a um arquivo para posterior leitura e análise no SEVME. O SEVME de posse dos dados de entrada pode então realizar as devidas inferências até chegar aos resultados esperados, ou seja, a conclusão da análise.

Para tornar realidade este processo, desenvolveu-se interfaces, conforme apresenta a Figura 4.1, para comunicação com o protótipo SEVME as quais são apresentadas no item 4.1.3.

Antes de verificar as interfaces envolvidas, apresenta-se conforme item 4.1.2 a forma sistemática definida para o uso do protótipo e alguns pontos verificados no desenvolvimento do protótipo ao se utilizar uma forma automatizada e que permitiu simplificar a interface do usuário para obtenção de dados de entrada necessários para análise do sistema.

4.1.2 Uso sistemático do protótipo e a simplificação da interface

O trabalho proposto visa contribuir para a solução de um problema na empresa alvo, que consome grande parte do tempo de quatro especialistas responsáveis pela tarefa de verificar projetos. Com os bons resultados do protótipo e sua implementação definitiva, poderá ser antecipada esta tarefa, ou seja, o próprio projetista pode executar a verificação do projeto considerando o conhecimento já implementado no sistema especialista. Isto significa que, mesmo em momentos de tensão e excesso de carga de trabalho, ao menos para as verificações

implementadas no sistema teriam maior acuracidade e conseqüentemente melhor qualidade na principal saída gerada, que é a estrutura do produto.

Com este intuito, adotou-se na equipe responsável por testar o sistema, um procedimento sistemático onde todo e qualquer novo projeto deve ser submetido à verificação deste protótipo, sem o qual o mesmo não é liberado para a produção.

A adoção do procedimento ao mesmo tempo em que trouxe credibilidade, por demonstrar que os usuários confiavam na análise do sistema, pode de certa forma ter gerado algum comodismo. Este comodismo se deve ao fato de que ao invés de adotar uma postura de se preocupar em fazer um projeto correto e evitando erros, os projetistas podem passar a atribuir ao sistema a responsabilidade em detectar algo que estivesse errado no projeto, já que o sistema SEVME poderia detectar e avisá-los de um possível erro.

O resultado do procedimento adotado foi que a cada nova situação de erro ainda não mapeada, esta era imediatamente direcionada como sendo mais um caso a ser implementado no sistema. O principal motivo que levou os especialistas a adotar esta postura ou sistemática de imediatamente pensar em como o SEVME poderia ajudar na solução é a rapidez com que o sistema encontra os problemas e objetivamente informa as ações e explicação do caso detectado.

Como conseqüência da decisão tomada no desenvolvimento deste sistema em simplificar a interface de interação do usuário com o sistema, e considerando que os dados de entrada devem existir em algum dos sistemas utilizados pela empresa, ocorreu que muitas das solicitações não puderam ser implementadas.

Esta situação, ao mesmo tempo em que demonstrou a importância que pode ter a interação do usuário com o sistema e que no caso do SEVME não ocorre, mostrou para a empresa alvo a necessidade: de garantir a qualidade das informações disponíveis e investir no mapeamento das informações que necessita para garantir um controle sistemático da qualidade de seus processos através da implementação de sistemas com o SEVME.

Por outro lado esta situação demonstra um ponto defendido pelos autores de estudos na área de sistemas especialistas, em que pode ser de fundamental importância a existência de uma interface com a qual o usuário possa estar interagindo. Este com certeza é um ponto a ser avaliado e uma proposição de trabalho futuro a ser desenvolvido. Como proposta pode-se avaliar a adoção de um cenário misto, onde uma parte dos dados pode ser adquirida automaticamente e

outra parte o usuário pode complementar e ou corrigir informações faltantes interagindo com o sistema através de uma interface apropriada a ser desenvolvida.

4.1.3 Estrutura geral do protótipo

A estrutura do protótipo conforme apresentado na Figura 4.1, pode ser analisada a partir de cinco pontos de comunicação principais além da interface de acesso ao sistema.

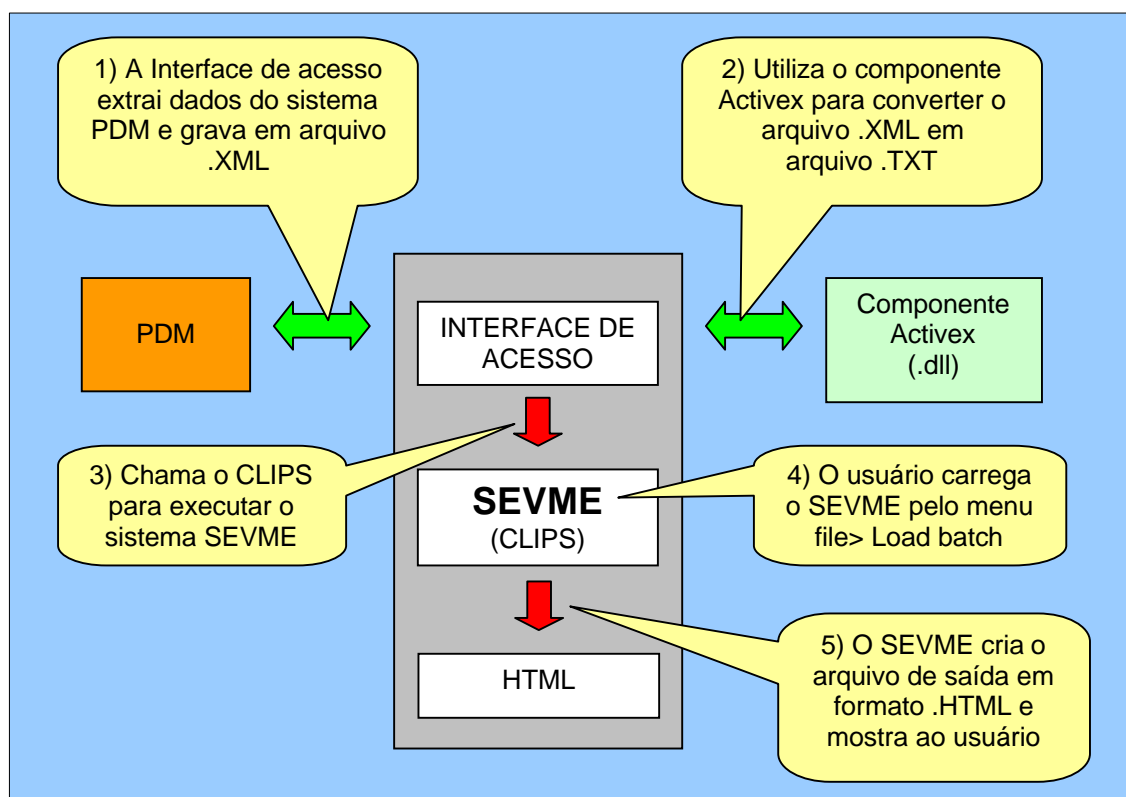


Figura 4.1 – Interfaces de comunicação com o sistema SEVME

Na interface de acesso ao sistema as únicas informações que o usuário necessita fornecer são: seu *login* (identificador do usuário do sistema) e o código do item (produto analisado, motor elétrico). O usuário após informar estes dados seleciona um botão denominado “Verificar Motor” e assim inicia-se o processo de busca de dados nos sistemas de informação da empresa alvo.

Um arquivo de dados modelo em formato “.xml” foi definido com o objetivo de armazenar e organizar os dados gerais, a estrutura e atributos do produto final

(motor elétrico) e de cada componente. Este arquivo “.xml” pode ser gerado a partir de qualquer sistema de origem.

Para o passo 1 da Figura 4.1, um programa “.exe” foi desenvolvido para extrair do sistema PDM da empresa alvo as informações necessárias as quais são armazenadas no arquivo “.xml”, para o qual um exemplo é apresentado no item A1.3 do apêndice 1. Os dados armazenados no arquivo “.xml” precisaram ser convertidos em um formato que o sistema especialista desenvolvido em CLIPS pudesse ler, o qual foi definido como sendo arquivo texto “.txt”.

Para esta conversão, representada no passo 2 da Figura 4.1, foi desenvolvido um componente *activex* (arquivo “.dll”) o qual pode ser usado por qualquer outro sistema que deseje comunicar-se com o sistema SEVME. O componente *activex* converte os dados que são lidos do arquivo “.xml” para o formato específico posteriormente acessado pelo protótipo.

No passo 3 da Figura 4.1, é chamado o programa CLIPS com o qual será executado o sistema especialista SEVME.

Como o CLIPS é outro executável e não é fornecido, na versão utilizada neste desenvolvimento, com uma forma amigável para comunicação direta por sistemas no padrão Windows, adotou-se um procedimento manual, passo 4 da Figura 4.1, no qual o usuário a partir do menu file do CLIPS, seleciona a opção “load batch”. Com este procedimento o usuário carrega o arquivo “.bat” com o código fonte do sistema especialista.

Na última etapa, passo 5 da Figura 4.1, o CLIPS executa o processo no qual se cria o arquivo de saída em formato “.html” o qual mostra-se ao usuário. Um exemplo de arquivo de saída é apresentado no item 4.3 deste capítulo que trata exclusivamente dos dados de saída para o usuário e dos dados de saída gerenciais.

4.2 Base de conhecimento, estrutura de classes e regras

No sistema especialista SEVME a base de conhecimento é composta por objetos e regras. As regras são utilizadas para definir as condições que determinam se a estrutura do motor apresenta algum tipo de erro. Para definição destas regras utilizou-se principalmente as propriedades dos objetos que identificam os componentes da estrutura do produto e também a relação entre o motor e a existência ou não de determinados componentes na estrutura do motor. A falta ou presença de um componente pode representar um erro na estrutura, assim como os atributos de um componente podem não ser compatíveis com outros que fazem parte do produto.

O conceito de objetos incorporado nas atuais linguagens que empregam modelagem orientada a objetos nasceu das idéias propostas por Marvin Minsk, que propôs estruturas denominadas quadros (frames) que consistem em um conjunto de atributos cujos valores descrevem o estado de uma entidade representada pelo quadro no instante considerado (ALVES, 2001).

Orientação a objeto é útil para armazenar dados complexos, volumosos e hierarquicamente arranjado (SILVA, 1998). A aplicação de orientação a requer o entendimento de certas propriedades chave: abstração, encapsulamento, herança e polimorfismo (GONZALEZ e DANKEL, 1993):

Abstração: para ignorar aspectos de algumas entidades que não são relevantes ao problema corrente, possibilitando concentrar esforços nos aspectos relevantes;

Encapsulamento: cada parte do programa esconde características cuja interface revela o mínimo possível, somente o importante a respeito do trabalho;

Herança: permite expressar características comuns a uma coleção de objetos de diferentes classes;

Polimorfismo: permite a cada classe responder a uma mesma mensagem de maneira diferente.

A aplicação das propriedades acima torna a técnica de orientação a objeto uma poderosa técnica na representação do conhecimento, proporcionando grande flexibilidade no desenvolvimento de sistemas especialistas de diferentes áreas (SILVA, 1998).

Uma análise mais profunda, com exemplos onde foram extensivamente aplicados os conceitos relacionados à modelagem orientada a objeto e suas técnicas de programação pode ser encontrada em (SILVA, 1998). Um relato dos

principais eventos ocorridos desde os anos 80 envolvendo os métodos de modelagem orientados a objeto é apresentada por Alves (2001).

Conforme pode ser observado no item 4.2.1, dos conceitos de modelagem orientada a objetos, na construção da estrutura de classes do protótipo em estudo, não se usou todo potencial da orientação a objetos, sendo apenas alguns conceitos, como a herança, mensagens (métodos) e propriedades utilizadas no desenvolvimento.

Ainda assim o uso destes conceitos foi fundamental, pois o uso de classes e atributos deu flexibilidade e foi fundamental no processo de expansão e implementação durante o desenvolvimento incremental do sistema. À medida que novos casos surgiram, novas classes de componentes foram adicionadas, novos atributos e novas relações do tipo “tem um” foram sendo implementadas na classe que representa o motor, seus atributos e componentes de sua estrutura.

4.2.1 Estrutura de classes do sistema especialista protótipo

Uma vez conhecidas as necessidades do sistema, resultado dos primeiros ciclos de aquisição de dados, definiu-se uma estrutura básica a partir da qual foi possível expandir a capacidade do sistema de forma incremental. Neste momento criaram-se as principais classes e sua hierarquia conforme Figura 4.2.

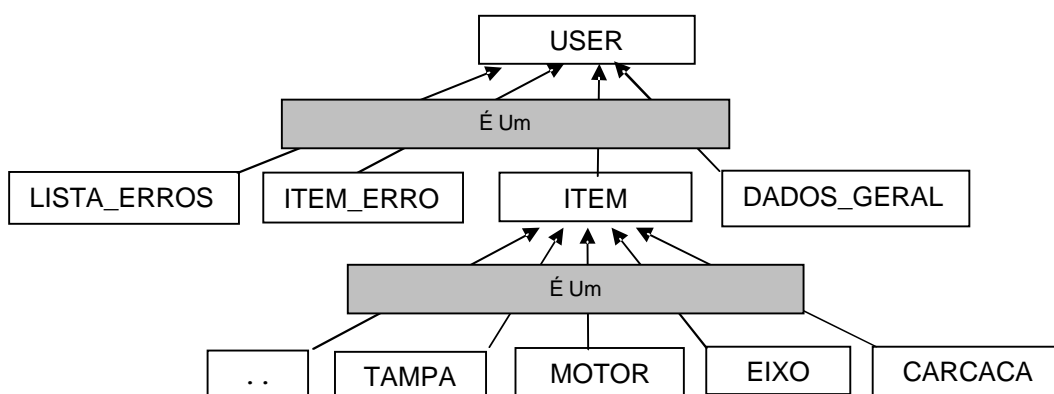


Figura 4.2 – Estrutura de classes inicial do protótipo.

A classe USER, conforme Figura 4.2, é a classe superior a todas as demais classes. Esta classe é uma classe pré-definida da qual todas as demais classes devem ser herdadas conforme a sintaxe definida pelo CLIPS. A herança pode ser direta, como no caso das classes DADOS_GERAL, ITEM_ERRO, LISTA_ERROS e

ITEM ou indireta como no caso das subclasses: TAMPA, MOTOR, CARCAÇA e EIXO.

As principais classes definidas para o sistema podem ser divididas em dois grupos:

Grupo 1) Neste grupo estão as classes de uso geral e que tem por função armazenar dados que serão utilizados ao final do processamento na geração do arquivo “.html” o qual apresenta o resultado da execução do sistema. Dentre estas classes estão a classe DADOS_GERAL, ITEM_ERRO, LISTA_ERROS.

Classe DADOS_GERAL:

Funcionalidade: armazenar dados do usuário, data e hora de utilização do sistema. Estas informações são utilizadas no final do processo na geração do arquivo de saída com os resultados da verificação.

Principais atributos:

- *login*: identifica o código do usuário que está operando o sistema;
- *nome*: identifica o nome do usuário que está logado no sistema;
- *ano, mês e dia*: identificam a data corrente;
- *hora e minuto*: identifica a hora e minuto da execução do sistema.

Classe ITEM_ERRO:

Funcionalidade: essa classe tem por função armazenar os dados referentes ao erro encontrado, o componente especial ao qual o erro está relacionado, a explicação do erro e a recomendação para a provável solução ao problema.

Principais atributos:

- *numero_regra*: identifica a regra que identificou o erro;
- *componente*: identifica o componente especial relacionado ao erro;
- *descricao1*: armazena a descrição e dados que permitiram identificar o erro;
- *descricao2*: armazena o complemento da descrição;
- *descricao3*: armazena a explicação referente ao erro encontrado;
- *descricao4*: armazena o complemento da explicação.

Classe LISTA_ERROS:

Funcionalidade: essa classe tem por função armazenar uma lista de erros detectados no processo de verificação e através do método *adiciona*,

permite enviar uma mensagem aos novos objetos de erro através da instanciação da classe ITEM_ERRO.

Principais atributos:

- *nr_erro*: identifica e armazena o objeto erro instanciado pelo método *adiciona*.

Método:

- *adiciona*: instancia um novo objeto erro o qual está relacionado com o componente especial a partir do qual se deu início a verificação do erro.

Grupo 2) Neste grupo estão as classes responsáveis por armazenar a base de conhecimento do sistema.

Classe ITEM:

Funcionalidade: essa classe contém atributos comuns às subclasses de componentes e da classe motor utilizados nas regras de verificação de erros. Esta classe não tem instância direta e é usada como classe pai de outras subclasses.

Principais atributos:

- *codigo*: armazena o código que identifica o objeto instanciado;
- *descricao*: armazena a descrição que identifica o objeto instanciado;
- *desenho*: identifica o código do desenho do objeto e é utilizado nas recomendações do sistema para corrigir informações;
- *especial*: identifica se o objeto é um componente especial da estrutura do motor elétrico.

As subclasses da classe ITEM, conforme exemplo apresentado a seguir seus atributos específicos que descrevem as propriedades de cada componente representado por uma classe.

Classe MOTOR:

Funcionalidade: a classe motor é definida com a relação do tipo “é uma” classe ITEM da qual herda seus atributos. É composta por atributos adicionais que representam as características e por campos que representam os componentes que fazem parte da estrutura do motor elétrico. A classe tem ainda o método “define medida prensagem”, definido para calcular o valor do atributo “medida prensagem”.

Principais atributos que representam as características da configuração do motor:

- *carcaca*: identifica o tamanho da carcaça do motor;
- *aplicacao*: identifica a aplicação definida para o motor;
- *graxeira*: identifica o sistema de lubrificação solicitado;
- *dreno* : identifica o sistema de dreno definido;
- *medida_prensagem* : armazena o valor deste atributo do motor calculado pelo método “*define medida prensagem*” desta classe.

Principais atributos (campos) que representam os componentes da estrutura do motor:

- *i_carcaca*: identifica um objeto *ITEM_CARACA*;
- *i_eixo*: identifica um objeto *ITEM_EIXO*;
- *i_tampa_dianteira*: identifica um objeto *ITEM_TAMPA_DIANTEIRA*;
- *i_tampa_traseira*: identifica um objeto *ITEM_TAMPA_TRASEIRA*;
- *i_graxeira_dianteira*: identifica um objeto *ITEM_GRAXEIRA_DIANTEIRA*;
- *i_graxeira_traseira*: identifica um objeto *ITEM_GRAXEIRA_TRASEIRA*;
- *i_rolamento_dianteiro*: identifica um objeto *ITEM_ROLAMENTO_DIANTEIRO*;
- *i_rolamento_traseiro*: identifica um objeto *ITEM_ROLAMENTO_TRASEIRO*;
- *i_ventilador*: identifica um objeto *ITEM_VENTILADOR*;
- *i_rotor_completo*: identifica um objeto *ITEM_ROTOR_COMPLETO*;
- *i_rotor_engaiolado*: identifica um objeto *ITEM_ROTOR_ENGAIOLADO*;
- *i_disco_rotor*: identifica um objeto *ITEM_DISCO_ROTOR*;
- *i_anel_fixacao_rolamento_dianteiro*: identifica um objeto *ITEM_ANEL_FIXACAO_ROLAMENTO_DIANTEIRO*.

Métodos: O método “define medida prensagem” da classe MOTOR permite que seja enviada uma mensagem ao objeto motor com objetivo de executar o cálculo da medida de prensagem conforme necessidade. A chamada que executa o cálculo é disparada ou não em função de regras que são ativadas pela máquina de inferência.

Classe ITEM_TAMPA:

Funcionalidade: essa classe representa um conjunto tampa e é definida com a relação do tipo “é uma” classe ITEM da qual herda seus atributos. Principais atributos que representam as características do conjunto tampa:

- *carcaca*: identifica para qual tamanho de carcaça de motor está apto;
- *graxeira*: identifica o sistema de lubrificação definido;
- *dreno* : identifica o sistema de dreno utilizado;

- *anel fixação*: identifica se o conjunto prevê a necessidade de anel de fixação.

Classe ITEM_TAMPA_DIANTEIRA:

Funcionalidade: essa classe representa um conjunto tampa dianteira e é definida com a relação do tipo “é uma” classe ITEM_TAMPA da qual herda seus atributos. No objeto motor esta classe é instanciada criando um objeto no qual a relação entre estes é do tipo motor “tem - uma” tampa dianteira.

Classe ITEM_TAMPA_TRASEIRA:

Funcionalidade: essa classe representa um conjunto tampa traseira que faz parte da estrutura do motor elétrico e segue o mesmo comportamento e relações definidas para classe tampa dianteira.

Classe ITEM_CARACA:

Funcionalidade: essa classe representa o conjunto carcaça e é definida a relação do tipo “é uma” classe ITEM da qual herda seus atributos. O termo carcaça é usado para identificar o tamanho do motor conforme conceitos apresentados no capítulo 2 e também identifica um dos componentes do produto. Para esta classe alguns atributos adicionais são definidos:

- *caraca*: identifica para qual tamanho de carcaça de motor está apto;
- *diâmetro interno*: identifica o diâmetro interno do componente;
- *comprimento útil* : identifica o comprimento útil para cálculo da medida de prensagem. Esta informação é utilizada no método define medida de prensagem do objeto motor.

Classe ITEM_EIXO:

Funcionalidade: essa classe representa o componente eixo e é definida a relação do tipo “é uma” classe ITEM da qual herda seus atributos. O eixo é um dos componentes mais alterados em um projeto de motor, pois além de transmitir movimento tem função de acoplamento. Também é o componente que mais está relacionado com outros componentes da estrutura do motor. Para esta classe alguns atributos adicionais são definidos:

- *caraca*: identifica para qual tamanho de carcaça de motor está apto;
- *aplicação*: identifica em quais aplicações o eixo pode ser utilizado;
- *diâmetro assento rotor*: utilizado em análise de interferência;
- *diâmetro assento rolamento dianteiro*: utilizado em análise de interferência;
- *diâmetro assento rolamento traseiro*: utilizado em análise de interferência;

- *diâmetro assento rolamento ventilador*: utilizado em análise de interferência;
- *comprimento guia prensagem*: identifica o comprimento utilizado para cálculo da medida de prensagem.

A Tabela 4.1 apresenta as classes e respectivos atributos que identificam os demais componentes da estrutura do motor.

Tabela 4.1 – Classes de componentes de motor elétrico.

Classe	Classe Superior	Atributos adicionais
ITEM_ROTOR_COMPLETO	ITEM	Medida prensagem
ITEM_ROLAMENTO	ITEM	Blindagem
		Diâmetro interno
		Diâmetro externo
		Largura
ITEM_ROTOR_ENGAIOLADO	ITEM	Comprimento pacote chapas
ITEM_DISCO_ROTOR	ITEM	Diâmetro interno
ITEM_ANEL_FIXACAO_ROLAMENTO	ITEM	Diâmetro interno

O rolamento é utilizado nos mancais dianteiro e traseiro do motor elétrico e a classe ITEM_ROLAMENTO tem, portanto duas subclasses, uma para o rolamento dianteiro e outra para o rolamento traseiro.

A estrutura completa de classes, suas propriedades, métodos e relações foram sendo construídos à medida que se avançou com novos casos implementados seguindo as fases do ciclo de desenvolvimento incremental.

4.3 Arquivo de saída, casos implementados e resultados obtidos

Como última etapa do desenvolvimento do protótipo trabalhou-se na apresentação dos dados de saída com informações úteis, de forma organizada e clara para o usuário do sistema. A forma e organização do arquivo de saída é apresentadas no exemplo da Figura 4.3 com base em casos reais de utilização do sistema SEVME.



Figura 4.3: Exemplo de resultado de verificação gerado pelo sistema SEVME.

Neste exemplo, são apresentados três alertas de erro. Os erros foram encontrados para três componentes distintos da estrutura de produto. Para cada um dos erros se apresentam os dados que foram utilizados para identificá-lo, uma explicação e a possível solução ou recomendação para o caso. A capacidade de explicar e justificar sua decisão são características típicas de sistemas especialistas.

O EC verificou junto ao projetista o que de fato ocorreu em cada um dos casos com objetivo de validar os resultados obtidos e apresentados pelo sistema SEVME.

Caso 1) Item 6824.1059 - RC 85MM - 4P – 80 (Figura 4.3) . Para este caso, ilustrado nas Figuras 4.4 e 4.5, detalhado no item A1.4 do apêndice 1, o arquivo de saída apresentou as seguintes informações:

- Explicação: identificou um problema no valor da medida de prensagem.
- Recomendação: verificar a medida de prensagem ou alguma das dimensões dos componentes envolvidos no cálculo.
- Erro real ocorrido: Neste caso o problema estava no cadastro de um dos atributos do componente carcaça.

Neste caso o sistema trabalhou com dados incorretos e desta forma gerou uma informação não totalmente correta. O que se quer dizer é que o erro na medida de prensagem do rotor foi encontrado pelo fato de dados incorretos terem sido adquiridos como resposta às perguntas do sistema. Ainda assim o sistema pode passar ao usuário informações úteis para que este pudesse verificar o erro e corrigi-lo da forma apropriada ao caso.

Considerando o caso visto cabe fazer uma análise da necessidade de se implementar o sistema e esclarecimento de algumas informações relevantes ao estudo. Ao verificar a riqueza de detalhes apresentados adiante nas Figuras 4.4 e 4.5 observa-se a qualidade e resultado obtido quando se utilizam ferramentas CAD. Como os sistemas CAD estão longe de serem inteligentes, e pela aparente sensação de organização e confiança transmitida ao ver um desenho “gerado pelo computador”, tem-se um risco ainda maior de erro. Por isto que existe a função de verificador, o que justifica mais uma vez a necessidade de se desenvolver um sistema como o deste trabalho.

Para compreender melhor este caso analisado pelo SEVME apresenta-se a seguir uma explicação detalhada dos dados envolvidos na análise iniciando pela medida de prensagem, valor 57 da Figura 4.4. A medida de prensagem é um valor numérico calculado que representa a dimensão da distância do encosto do rolamento em que o pacote de discos do rotor deve ser posicionado no eixo. Como consequência da medida de prensagem, é determinado o afastamento (distância ou

folga mínima = “X”) entre a parte girante (aletas do rotor) e a parte fixa (anel interno). Um erro de cálculo, devido a uma mudança, por exemplo, no projeto do eixo, pode gerar um erro como o simulado na Figura 4.5, no qual ocorre o choque entre as aletas do rotor e o anel interno de fixação do rolamento.

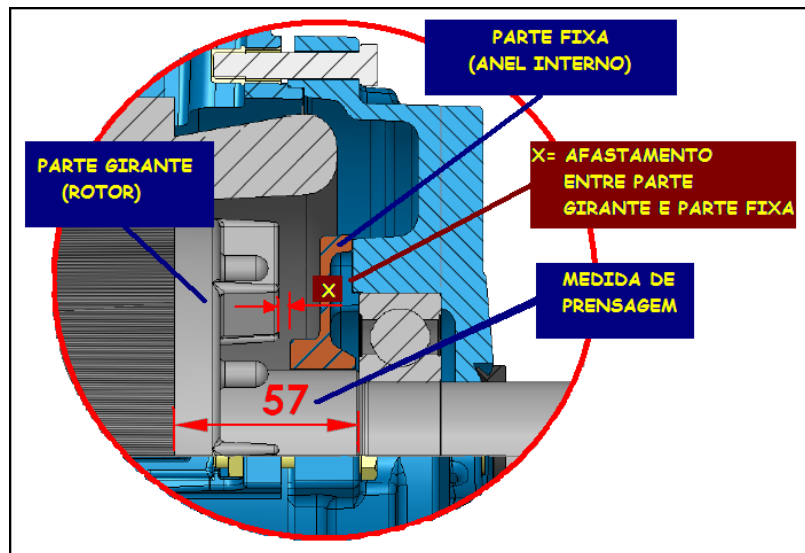


Figura 4.4 – Desenho ilustrativo da medida de prensagem do rotor no eixo do motor

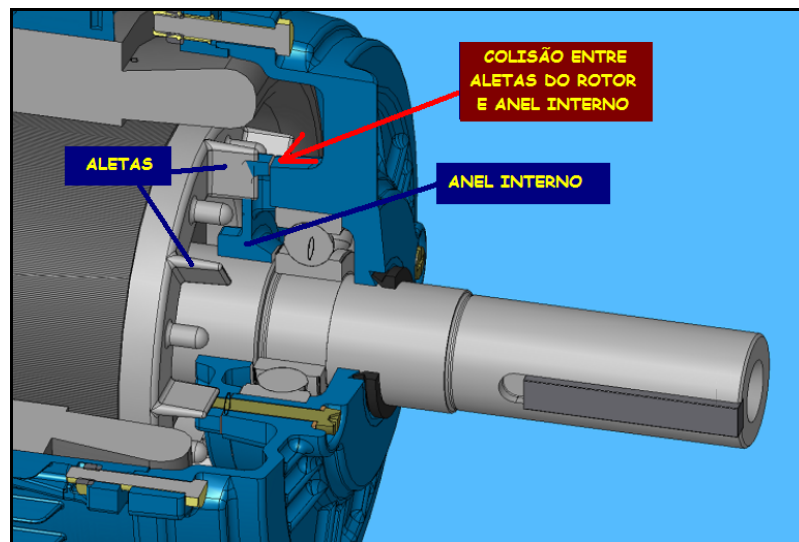


Figura 4.5 – Simulação de colisão devido a erro na medida de prensagem

Para implementar este caso foram criadas regras auxiliares as quais identificam as propriedades de alguns objetos (componentes da estrutura do motor) e determinam a necessidade de verificar o erro.

Uma das regras auxiliares que determinou a verificação deste erro utiliza, por exemplo, os seguintes fatos e propriedades de objeto:

Se encontrado o Fato: (fase verificação)

e Objeto Eixo tem o atributo Especial com valor igual a Sim

Então

O Fato: (verificar medida prensagem) é inserido na memória temporária.

Caso 2) Item 6024.2496 – TPA TRAS 80 (Figura 4.3). Para este caso o arquivo de saída apresentou as seguintes informações:

- Explicação: identificou um problema no atributo dreno.
- Recomendação: confirmar a informação solicitada no motor ou configurar corretamente o motor de acordo com as especialidades.
- Erro real ocorrido: Neste caso a configuração do motor, feita por vendas, não estava de acordo com a solicitação do desenho do cliente.

Caso 3) Item 6824.1042 – EIXO TRIF 80 ESP (Figura 4.3). Para este caso o arquivo de saída apresentou as seguintes informações:

- Explicação: identificou divergência entre diâmetros interno do ventilador e do assento no eixo.
- Recomendação: Caso o erro não proceda corrigir os valores das dimensões na base de dados da empresa.
- Erro real ocorrido: o projetista utilizou um ventilador com diâmetro fora do especificado para o eixo. Como o eixo era especial, o projetista deveria ter se lembrado de verificar se o diâmetro de assento do eixo especial se alterou em relação ao eixo padrão que estava sendo utilizado.

Um caso semelhante é o da Figura 4.6 para o qual um exemplo de código implementado é apresentado no item A1.5 do apêndice 1. Este caso pode ocorrer quando o cliente solicita uma ponta de eixo com diâmetro maior que o normal especificado. Dependendo do diâmetro solicitado, é necessário criar ou utilizar não somente um eixo especial, mas também um anel interno, tampas e sistema de vedação específico para nova dimensão do eixo especial. Os pontos indicando a

interferência na Figura 4.6 mostram que não seria possível montar este produto, gerando assim um erro no projeto.

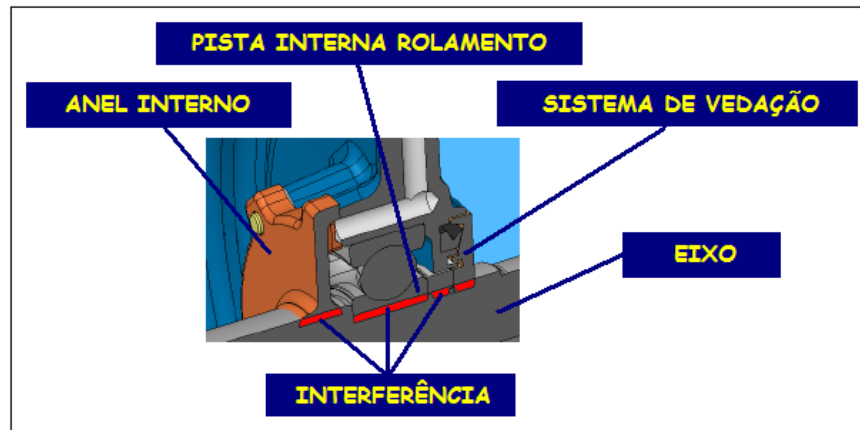


Figura 4.6 – Interferência de montagem do eixo em relação ao anel interno, rolamento e sistema de vedação.

Ao final de cada execução do sistema SEVME os dados de saída são armazenados em arquivo no formato “.xls” (Excel) conforme exemplo da Figura 4.7.

Microsoft Excel - SE_TOTAL_WMOS\$GCU.xls								
Arquivo Editar Exibir Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda								
C341								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	motor	usuario	ano	mes	dia	hora_min	regras	total
2	70553030	WMO\$GC	2007	3	1	07:07		13
3	70552442	wmo\$gcu	2007	3	1	12:01	13 6 7	
4	70552442	wmo\$gcu	2007	3	1	12:03		13
5	70552575	WMO\$GC	2007	3	1	12:32	13 6 5 7	
6	70552575	WMO\$GC	2007	3	1	12:33		13
7	20875385	wmo\$gcu	2007	3	1	13:37	13 6 5	
8	20875385	wmo\$gcu	2007	3	1	13:50		13
9	70519892	wmo\$gcu	2007	3	1	13:56		13
10	70552965	wmo\$gcu	2007	3	1	14:01		13
11	82068	wmo\$gcu	2007	3	1	15:53	6 5 7	
12	20816637	wmo\$gcu	2007	3	8	08:40	6 5 7	
13	70553175	wmo\$gcu	2007	3	8	09:24	13 6 5 7	
14	70553175	wmo\$gcu	2007	3	8	09:35	13 7	

Figura 4.7 – Tabela Excel com exemplo de registros gerados pelo sistema SEVME.

Associado a sua utilização, dos dados da Figura 4.7 gera-se estatísticas por usuário, número de divergências identificadas por componente, entre outras. Estes

indicadores podem ser utilizados para avaliar a qualidade dos projetos emitidos, identificarem a necessidade de treinamento e conscientização dos projetistas, e assim aumentar o conhecimento específico dos projetistas em determinado assunto e buscar como resultado final a diminuição do volume de erros da área de projeto.

O sistema SEVME foi executado as primeiras vezes em junho de 2006. A partir de agosto do mesmo ano os resultados foram registrados em arquivo. Destes foram utilizado para análise no trabalho os registros, conforme Tabela 4.2, desde seu início até final de março de 2007.

Tabela 4.2 – Número de ocorrências dos casos verificados pelo SEVME.

Data de Implantação	Regras de verificação	Número de ocorrências	Descrição do caso verificado
jun/06	Caso 1	0	Divergência na graxeira entre as tampas dianteira e traseira
jun/06	Caso 2	0	Blindagem do rolamento do mancal dianteiro
jun/06	Caso 3	0	Blindagem do rolamento do mancal traseiro
jun/06	Caso 4	42	Graxeira do motor em relação as tampas
ago/06	Caso 5	91	Interferência no assento do rolamento dianteiro
ago/06	Caso 6	108	Interferência no assento do rolamento traseiro
ago/06	Caso 7	93	Interferência no assento do ventilador
ago/06	Caso 8	16	Assento do rotor no eixo
ago/06	Caso 9	0	Divergência na especific.de graxeira e estrutura na tampa dianteira
ago/06	Caso 10	0	Divergência na especific.de graxeira e estrutura na tampa traseira
ago/06	Caso 11	207	Medida Prensagem
fev/07	Caso 12	4	Cubo prensagem do rolamento dianteiro
fev/07	Caso 13	15	Especificação do dreno e estrutura da tampa dianteira
fev/07	Caso 14	14	Especificação do dreno e estrutura da tampa traseira
fev/07	Caso 15	0	Verificação dos pacotes de rotor e estator
	TOTAL =	590	

No período analisado o sistema foi executado 580 vezes. Para cada execução com problemas mais de uma ocorrência de erro pode ser detectada.

O sistema SEVME não libera o projeto enquanto algum erro for detectado. Com isto o usuário após corrigir os erros detectados volta a executar o sistema pelo menos mais uma vez para comprovar que sua ação foi efetiva. Isto significa que a cada execução com problema uma nova execução é feita para garantir que a correção foi efetiva. Como em alguns casos o usuário fechava o arquivo de dados de saída, acabava executando para o mesmo item de motor até mais de duas vezes.

Na execução do sistema mais de um erro pode ser encontrado, como no caso do exemplo da Figura 4.3 no qual 3 erros foram identificados. As 590 ocorrências, conforme Tabela 4.2 são o somatório de todos os casos em todas as execuções do sistema, das quais foram encontrados erros em 306 execuções. A relação de 590 ocorrências em 306 execuções nos dá uma média de quase 2 casos por execução.

Conforme discutido no item 4.1.1, verificou-se a possibilidade de utilizar o sistema também com a função de “identificar problemas de cadastro de informações na base de dados da empresa”. Alguns casos de erro, conforme mostra o gráfico, apresentaram número de ocorrências muito maior que outros. Estes casos estão sendo mascarados por outros problemas que não estão relacionados à estrutura de produto. Um exemplo são os problemas no cadastro de atributos de componentes, ou seja, as características que os identificam. Nem por isto os erros detectados pelo sistema SEVME devem ser desconsiderados, pois demonstra, para alguns casos, a pouca qualidade das informações disponíveis no sistema de informação da empresa alvo. Este fato ocorreu com as regras dos casos 5, 6, 7 e 13.

Para os casos 1, 2, 3, 9 e 10 não se verificou qualquer ocorrência. A explicação para este fato é que as regras correspondentes a estes casos foram implementadas por solicitação da gerência pela gravidade e conseqüências geradas para empresa referente a casos isolados em que este erro ocorreu e que gerou prejuízos à empresa. Desta forma mesmo sendo isolados, foram implementadas as regras com objetivo de evitar qualquer possibilidade de reincidência dos casos, desde que o projetista execute o sistema protótipo SEVME. A importância dada ao caso mostrou aos projetistas que a sistemática adotada, conforme apresentada no item 4.1.2, tem uma forte justificativa, apoio e cobrança da gerência para fazer deste sistema uma ferramenta de uso diário.

4.4 Verificação e Validação do protótipo

Na etapa de verificação a cada nova regra o EC simulava a execução do sistema por diversas vezes considerando diferentes dados de entrada. Segundo Giarratano (2002), o uso de herança faz com que o comportamento de uma classe seja semelhante a sua classe superior, com isto pode reduzir substancialmente o processo de verificação e validação (V&V) dos manipuladores de mensagens (métodos) de uma classe. Para Giarratano (2002), a V&V essencialmente significa

que o produto foi construído adequadamente e que está de acordo com sua especificação.

Como exemplo segue a Figura 4.8 onde se apresenta o resultado de uma execução onde foram fornecidos dados com problema para forçar a execução de diversas regras em uma única execução.

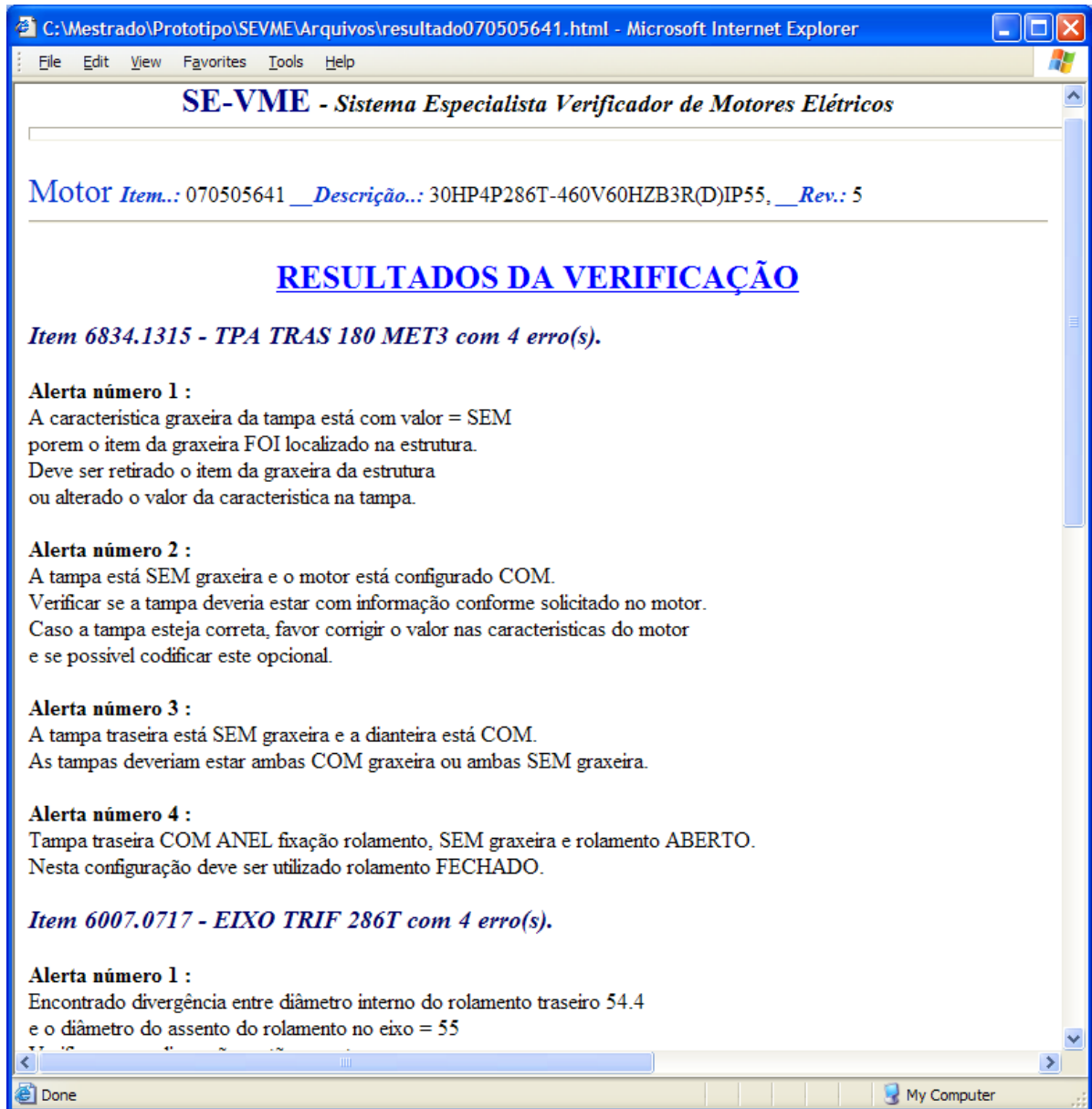


Figura 4.8 – Resultado de uma execução do sistema na fase de Verificação.

As etapas de aquisição, representação, implementação e verificação se repetiram a cada novo erro. Ao final deste ciclo, para cada erro analisado se acrescentam novas regras as quais que caso estejam presentes os fatos que a tornam verdadeira permitem ao sistema detectar o erro. Nesta fase participaram o

EC na etapa de pré-validação individual das regras e o EH participava dos testes para fornecer seu parecer com relação aos dados fornecidos pelo sistema principalmente com relação a clareza das explicações para cada nova regra.

Já a etapa de validação, executada por 3 vezes durante o desenvolvimento, o sistema foi avaliado pelos usuários utilizando casos reais como o do exemplo analisado no item 4.3. A ordem cronológica das validações foi conforme segue:

A primeira validação ocorreu em junho de 2006. Nesta fase o sistema esteve capacitado a detectar os quatro primeiros casos, conforme Tabela 4.2, de possíveis erros em uma estrutura de motor elétrico.

A validação foi acompanhada de perto pelo EC o qual tomou nota dos problemas encontrados com objetivo de solucioná-los o mais breve e assim não passar uma impressão errada em relação ao funcionamento do sistema. Nesta primeira versão a saída do sistema era textual na tela padrão do CLIPS.

Diferenças na configuração do sistema de unidade de medida padrão do Windows, entre o configurado na máquina do EC e do projetista (usuário), trouxeram alguns transtornos até se descobrir o problema. Esta diferença causava por exemplo erros no cálculo da medida de prensagem.

Na segunda fase de validação, a qual ocorreu em agosto de 2006, o sistema já contou com 11 casos implementados. Nesta fase também já foi possível ao usuário receber as informações de saída em arquivo “.html” conforme exemplo da Figura 4.8. Com esta melhoria, além da expansão da capacidade do sistema o usuário se mostrou mais satisfeito e confiante quanto aos resultados alcançados. Neste estágio foram acrescentadas regras para verificação dos casos 5, 6, 7, 8, 9, 10 e 11 conforme Tabela 4.2.

O sistema permaneceu sem novas implementações desde agosto de 2006 até fevereiro de 2007. Neste período alguns ajustes e correções foram aplicados à medida que surgiam situações não consideradas na fase de aquisição do conhecimento. A partir de fevereiro de 2007, por solicitação do EH, repetiu-se todo o ciclo para 4 novos casos. No mês de março de 2007 ocorreu a última validação geral do sistema considerando os casos 12, 13, 14 e 15 abaixo descritos:

Caso 12) Cubo de prensagem do rolamento dianteiro. Neste caso o sistema passou a verificar se, em função do uso do componente rolamento especial ou de qualquer outro componente especial na estrutura do conjunto tampa, pudesse

ocorrer que os diâmetros, externo do rolamento e interno do cubo da tampa, já não fossem mais compatíveis.

Casos 13 e 14) Especificação do dreno e estrutura da tampa dianteira e traseira. Ocorre que o componente dreno é apenas um dos que compõe a estrutura do conjunto tampa, conforme exemplos apresentados no capítulo 2. O conjunto tampa é formado por aproximadamente 10 componentes. A alteração de qualquer um destes pode fazer com que seja necessário criar um novo conjunto fantasma (conforme apresentado no capítulo 2). Ao fazer esta alteração o projetista inicia o processo utilizando um conjunto base para efetuar a cópia e após fazer as devidas adequações na estrutura do conjunto. Este processo de cópia é responsabilidade do projetista, e a seleção do conjunto base depende do seu conhecimento em buscar um conjunto o mais próximo possível e que requeira o mínimo de alterações. Ainda assim há que se considerar que o dreno neste caso é só mais um dos componentes e pode como comprovado pelas ocorrências apresentadas na Tabela 4.2 passar despercebido e não ser corretamente definido na estrutura

Em março de 2007 já haviam sido implementadas regras para 16 casos de verificação no sistema SEVME. À medida que o sistema evoluiu mais usuários constataram os benefícios da utilização do sistema. Um dos EH, Sr. Jaimor José Perito com mais de 20 anos de empresa, desejou expressar sua opinião com relação ao resultado do trabalho e cujo registro de seu depoimento feito por e-mail é apresentado a seguir:

“EC, desejo manifestar a minha satisfação em relação ao trabalho realizado sobre o verificador que foi implantado no sistema, possibilitando que a estrutura do produto seja liberada com maior acuracidade. Desta forma, erros que vinham acontecendo estão sendo reduzidos drasticamente. Com este trabalho obrigou que várias outras atividades sejam também controladas tal como: cadastro correto do componente, posição do componente dentro da estrutura, redução do número de não-conformidades recebidas das fábricas, aumento desta forma a auto estima dos projetistas que não necessitam mais fazer a verificação visual das estruturas depositando confiança no auto controle que o verificador exerce na elaboração da estrutura do produto”. Este foi o depoimento do especialista Sr Jaimor José Perito, o qual participou do processo de desenvolvimento do sistema especialista SEVME.

Este depoimento retrata o resultado do trabalho, comprovando e validando o uso de sistemas especialistas na atividade de verificação da estrutura de produto de motores elétricos.

4.5 Resumo do Capítulo

Este capítulo apresentou a implementação da base de conhecimento através do uso de regras e objetos. Para os objetos se apresentou a estrutura de classes com exemplos utilizados no sistema desenvolvido.

Foram também apresentados casos de regras implementadas no sistema SEVME além das interfaces criadas para comunicação entre o sistema especialista desenvolvido em CLIPS e o sistema PDM provedor dos dados de entrada utilizados no processamento das regras.

Aspectos relacionados a forma adotada para obtenção de dados de entrada também foram discutidos neste capítulo.

Ao final do capítulo apresentaram-se detalhes da etapa de verificação, a ordem cronológica na qual foram realizadas as validações do sistema e por fim o depoimento de um dos especialistas. Este depoimento retratou o resultado do trabalho, comprovando e validando o uso de sistemas especialistas na atividade de verificação da estrutura de produto de motores elétricos. No próximo e último capítulo são apresentadas as contribuições, recomendações e conclusões finais do trabalho.

CAPÍTULO V

Neste último capítulo apresentam-se as principais contribuições deste trabalho, recomendações para trabalhos futuros e as conclusões finais, além de uma avaliação como um todo do que representou para a empresa e para o mestrando a realização desta dissertação.

5.1 Contribuições

O desenvolvimento e a contínua utilização de ferramentas como a apresentada neste trabalho contribuiu de forma a criar uma cultura voltada para a busca da melhoria e pró-atividade dos envolvidos no processo. Mostrando assim que é de fundamental importância garantir ao máximo a qualidade das informações, principalmente no que se refere a BOM Final que é disponibilizada para a fabricação do produto.

Com a participação na fase de aquisição do conhecimento e pelos resultados obtidos, pode-se perceber a satisfação dos especialistas pela valorização da atividade de verificação do projeto.

O procedimento adotado pela equipe responsável pelos testes, de todo e qualquer novo projeto passar pela verificação do protótipo, sem o qual o mesmo não é liberado para a produção, comprova a importância dada ao trabalho e a confiança depositada na obtenção de resultados que contribuam com sua atividade. Os especialistas e usuários compreenderam que o sistema SEVME foi criado como ferramenta de auxílio e não como algo que os pudesse tirar de sua função.

O uso dos resultados obtidos permite aos gestores avaliar a qualidade dos projetos liberados pelo departamento da empresa alvo e identificar a necessidade de treinamento com base nos erros detectados e registrados pelo sistema SEVME.

Qual a contribuição do ponto de vista de HH (hora homem) de projetista ? A implementação e redução no volume de erros podem diminuir a quantidade de projetistas alocados para execução da atividade de correção de erros de projeto. Atualmente na empresa alvo cada equipe de projeto conta um projetista responsável

por tal atividade e que pode ser melhor aproveitado em atividades de concepção de projeto no lugar de correção.

Qual a economia em não conformidade ? A economia em não conformidade é diretamente proporcional ao tamanho do lote produzido e a fase do ciclo de vida na qual um erro é identificado. A cada erro identificado podem ser contabilizados os custos que seriam empregados de matéria prima, mão-de-obra nos processos de transformação e montagem, os custos de análise e re-projeto devido ao erro causado, os custos de ter uma linha de montagem parada aguardando a fabricação de materiais que tiveram que ser substituídos quando não sucatados.

E qual a repercussão para a imagem da empresa ? Um erro identificado ainda na fase de projeto pode significar a conquista da fidelidade de um cliente enquanto o não identificado pode facilmente indicar a presença da concorrência em vendas futuras.

5.2 Recomendações e trabalhos futuros

Para empresa alvo, recomenda-se definir no processo de desenvolvimento de novas linhas de produtos, uma etapa de avaliação, da necessidade de implementação ou adequação de regras novas ou existentes. Esta ação preventiva pode contribuir para redução do índice de erros não identificados na fase verificação da estrutura de produto de novas linhas de produto.

Algumas solicitações de casos de erro não puderam ser implementadas no sistema devido à falta de informação confiável nos sistemas de informação da empresa. Neste sentido recomendam-se duas ações importantes e que podem contribuir para que a empresa possa expandir o uso do sistema SEVME bem como melhorar a qualidade de suas informações. Estas ações são:

- Primeiro reavaliar que tipo de informação é útil ao usuário no momento em que necessita pesquisar um componente que possivelmente já foi desenvolvido, neste caso o usuário, pela falta de informação confiável, pode não localizar na base de dados da empresa este componente e com isto acaba usando seu tempo com a criação de novos desenhos iguais aos já existentes.

- Em segundo lugar propõe-se, depois de executado o primeiro passo e com base nos resultados obtidos das execuções do sistema SEVME, a realização de um esforço adicional por parte da empresa alvo. O esforço é no sentido de revisar pró ativamente todas as informações, mais exatamente os atributos (características) usados ou para pesquisa pelos próprios projetistas ou pelo sistema SEVME no processo de verificação da estrutura do produto.

A empresa encontra-se em processo de migração para uma nova ferramenta ERP, com o qual, caso a empresa tenha interesse em manter a utilização do sistema especialista, deve se aprofundar o estudo dos sistemas *SHELL* como foco em buscar alternativas para melhorar a integração do sistema especialista com os sistemas de informação da empresa.

A decisão tomada no desenvolvimento deste sistema em simplificar a interface de interação do usuário com o sistema mostrou uma situação que indica a possibilidade de melhorar e evoluir no desenvolvimento do protótipo. Para esta evolução propõe-se avaliar a adoção de um cenário misto, onde os dados de entrada possam ser complementados pela interação do usuário através de interface com o sistema. Neste cenário, o usuário pode estar complementando ou corrigindo as informações não encontradas no processo automatizado de entrada de dados.

5.3 Conclusões

Como benefício geral, a utilização de sistemas especialistas proporciona o aprendizado de projetistas menos experientes o que poderá ser comprovado caso venha a se expandir o uso do sistema SEVME ou de outros sistemas especialistas do gênero nas demais equipes de projeto da empresa alvo.

O sistema SEVME em seu período de utilização identificou potencial para treinamento com base nos erros mais comumente identificados, conforme resultados analisados.

O desenvolvimento do sistema só foi possível pelo envolvimento, entusiasmo e disponibilidade dos especialistas, os quais se mostraram motivados e principalmente interessados nos benefícios e resultados alcançados com o trabalho realizado.

Os resultados obtidos na utilização do protótipo demonstraram e comprovaram a viabilidade de utilização de sistemas especialistas aplicados na atividade de verificação de estruturas de produto de motores elétricos.

Este mestrado demonstrou que a categoria de cursos de mestrado profissionalizante, onde participam do processo exclusivamente profissionais que trabalham em empresas, é de grande importância e permite a obtenção de excelentes resultados para empresa e para o profissional.

Para a empresa os benefícios surgem quando conceitos e teorias aprendidas nas disciplinas do curso de pós-graduação se transformam em trabalhos com aplicação prática como no caso do presente trabalho.

Para o profissional os benefícios são compreendidos como uma oportunidade de reciclar seu conhecimento e a satisfação de ver seu esforço e dedicação transformados em resultados práticos e que valorizam seu trabalho na empresa.

Por outro lado comprovou que nesta categoria de curso, pelo ritmo acelerado do crescimento, como no caso da empresa alvo, é necessária uma dose extra de colaboração da empresa no sentido de permitir ao profissional o desenvolvimento da pesquisa relacionada ao trabalho de mestrado também durante seu expediente normal de trabalho na empresa.

Do mestrando requer persistência e dedicação adicional, privando-se por vezes da presença da família, pois requer horas de estudo adicional em horários além da jornada de trabalho da empresa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEL, M. **Estudo da perícia em petrografia sedimentar e sua importância para a engenharia de conhecimento**. Porto Alegre: Programa de PG em Ciência da Computação, 2001. 239p. Tese de Doutorado. Capítulo 2. p. 25-31.

ALVES, Guilherme Dionízio. **Sistema Especialista protótipo para diagnóstico de falhas em um sistema hidráulico naval**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. UFSC, Florianópolis, 2001.

CHORAFAS, Dimitris N. **Knowledge engineering: knowledge acquisition, knowledge representation, the role of the knowledge engineer, and domains fertile to A.I. implementation**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990.

BACK, N. **Metodologia de Projeto de Produtos Industriais**. Guanabara Dois, 1983.

ELISEI, J.L.; OSTELLINO, R. **Um Sistema Especialista em Orçamento para uma Empresa de Fundição de Aço**. Guaratinguetá, 2003, 74p. Monografia de Especialização em Informática Empresarial, Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

FILIPPO, Guilherme F. **Motor de Indução**. Editora Érica, São Paulo, 2000.

FORCELLINI, Fernando A. **Apostila de Desenvolvimento de Projetos**. UFSC, Florianópolis, 2004.

GIARRATANO, J; RILEY, G. **Expert Systems-Principles and Programming**. Segunda edição, PWS Publishing Company, 1994.

GONZALEZ, Avelino J.; DANKEL, Douglas D. **The Engineering of Knowledge-Based Systems- Theory and Practice**, Prentice-Hall, Inc.,1993.

KURZWEIL, R. **The age of Intelligent Machines**. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1990.

LUGER, G.F; STUBBLEFIELD, W.A. **Artificial Intelligence : Structures and Strategies for Complex Problem Solving**. Benjamim/Cummings, Redwood City, California, second edition, 1993.

LUSTOSA, Volney Gadelha. **O estado da arte em inteligência artificial**. Colabor@ Revista Digital da CVA, Brasília, v. 2, n. 8, set. 2004.

McCARTHY J., (2000) **John McCarthys' Webbpape Stanford University** [www] Disponível em: <http://www-formal.stanford.edu/jmc/whatisai/node3.html>, tradução própria, acesso em Julho 2001.

NORLANDER, Tomas E. **AI Surveying: Artificial Inteligence in Business**. Tradução própria. Dissertação de Mestrado. Universidade de Montfort, 2001.

NORTON, Robert L. **Projeto de Máquinas: uma abordagem integrada**. Tradução de João Batista de Aguiar, José Manoel de Aguiar...[et al.]. 2ª edição, Bookman, Porto Alegre, 2004.

PASSOS, Alexandra dos. **Desenvolvimento de Sistema Especialista aplicado à Assistência Técnica: Estudo de caso em uma organização fabricante de produtos de telecomunicações**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, UFSC, março 2005.

RICH, E.; KNIGHT, K. **Artificial Intelligence**. McGraw-Hill Book Company, 1991.

ROZENFELD, Henrique; FORCELLINI, Fernando A.; [et al.]. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos: Uma Referência para a Melhoria do Processos**. Editora Saraiva, São Paulo, 2006.

SAAKSVUORI, Antti; IMMONEN, Anselmi. **Product Lifecycle Management**. Tradução própria. Springer, Heidelberg, 2004.

SCHALKOFF, R.J. **Artificial Intelligence: An Engineering Approach**. McGraw-Hill, New York, 1990.

SILVA, Jonny Carlos da. **Expert System prototype for hydraulic system design focusing on concurrent engineering aspects**. (Tese de Doutorado), Florianópolis: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFSC, 1998.

ULLMAN, David G. **The mechanical desing process**. Tradução própria. 3ª edição, McGraw-Hill, New York, 2003.

WATERMAN,D.A. **A Guide to Expert Systems**. Tradução própria. Addison-Wesley Publishing Company, 1986.

WEG. **Catálogo Geral de Motores Elétricos**. Disponível em <http://www.weg.com.br>, acesso em julho/2007.

YOUNG, C. (1998). **Compton's Encyclopaedia Online**. Disponível em: http://www.comptons.com/encyclopedia/ARTICLES/0000/00121600_A.html, tradução própria, acesso em Julho 2007.

APENDICE 1**A1.1 – Algarismos indicativos do grau de proteção**

As tabelas A1.1 e A1.2 apresentam o significado do 1º. e 2º. algarismos do grau de proteção para equipamentos elétricos.

Tabela A1.1 – 1º Algarismo do grau de proteção. Adaptado do Catálogo Geral de Motores Elétricos WEG (2006).

1º ALGARISMO	
ALGARISMO	INDICAÇÃO
0	Sem proteção
1	Corpos estranhos de dimensões acima de 50mm
2	Corpos estranhos de dimensões acima de 12mm
3	Corpos estranhos de dimensões acima de 2,5mm
4	Corpos estranhos de dimensões acima de 1,0mm
5	Proteção contra acúmulo de poeiras prejudiciais ao motor
6	Totalmente protegido contra a poeira

Tabela A1.2 – 2º Algarismo do grau de proteção. Adaptado do Catálogo Geral de Motores Elétricos WEG (2006).

2º ALGARISMO	
ALGARISMO	INDICAÇÃO
0	Sem proteção
1	Pingos de água na vertical
2	Pingos de água até a inclinação de 15° com a vertical
3	Água de chuva até a inclinação de 60° com a vertical
4	Respingos de todas as direções
5	Jatos d'água de todas as direções
6	Água de vagalhões
7	Imersão temporária
8	Imersão permanente

A1.2 – Exemplo e explicações do processo de configuração de produto

O processo de configuração consiste em definir valores para um conjunto pré-definido de características, como por exemplo definir o valor vermelho para a característica cor e 160L para a característica carcaça do motor. A cada valor distinto informado para uma característica do conjunto, um novo produto é criado e identificado por sua configuração. Para uma melhor compreensão vale explicar que para configurar um motor elétrico, são utilizadas aproximadamente 120 características. Destas no mínimo 16 características principais devem ser preenchidas, sendo as demais deduzidas por regras de relacionamento, gerando o que é definido como as características padrão do produto. Em sua maioria, cada uma das características deduzidas pode receber um valor diferente do padrão, neste caso denominado opcional caso já tenha sido desenvolvido e aprovado conforme as fases de projeto assim o determinam.

Tabela A1.3 – Exemplo de resultado de uma configuração de produto

Característica	Valor da característica
Mercado	Brasil
Aplicação	A prova de explosão
Invólucro	Fechado
Material do invólucro	Ferro fundido
Norma	IEC
Potência	35kW
Tensão	220/380V
Polaridade	4Polos
Carcaça	132S
Vedação	Retentor
Bitola da rosca	RWG 1/2”
Cor	Vermelho
Tipo de chaveta	A
....	

A inclusão de valores especiais para as características disponíveis no processo de configuração do produto gera a necessidade de se criar um desenho de conjunto, o qual passa por aprovação do cliente, conforme mostrado na Figura A1.1.

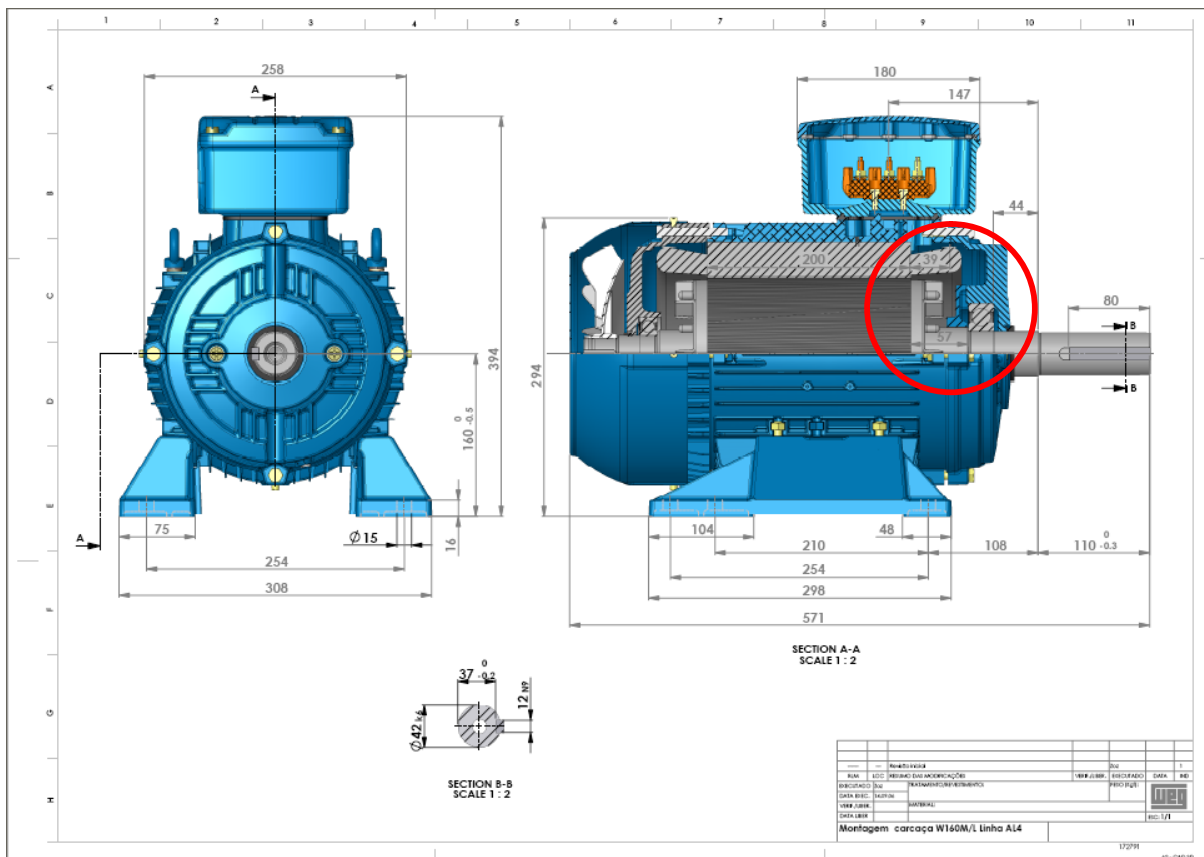


Figura A1.1 – Desenho de conjunto de aprovação.

A1.3 – Exemplo de arquivo de comunicação em formato padrão XML

Neste arquivo são armazenados os dados de entrada utilizados no processamento de regras e carga de dados dos objetos do sistema SEVME.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
- <SEWEG version="1.0">
- <bloco nome="DADOS_GERAIS" entidade="d_geral">
- <atributos>
  <geral codigoSE="nome" valor="Gustavo Cristiano Utzig" />
  <geral codigoSE="login" valor="WMO$GCU" />
  <geral codigoSE="ano" valor="2007" />
  <geral codigoSE="mes" valor="3" />
  <geral codigoSE="dia" valor="29" />
  <geral codigoSE="hora" valor="13" />
  <geral codigoSE="minuto" valor="13" />
</atributos>
</bloco>
+ <bloco nome="DADOS_MOTOR" entidade="i_motor">
- <bloco nome="DADOS_COMPONENTES">
- <componentes>
+ <componente tipo="i_eixo" item="6814.1656" origem_item="1600#0020" item_conjunto=""
  origem_conjunto="">
- <componente tipo="i_tampa_dianteira" item="6814.1673" origem_item="2400#2401"
  item_conjunto="" origem_conjunto="2400">
- <atributos>
  <geral codigoSE="codigo" valor="6814.1673" origem_pdm="cd_item" />
  <geral codigoSE="descricao" valor="TPA FC-149 90" origem_pdm="ds_generica" />
  <geral codigoSE="especial" valor="SIM" origem_pdm="tp_produto" />
  <geral codigoSE="desenho" valor="6104.9703" origem_pdm="cd_item_md" />
  <caract codigoSE="a_graxeira" valor="" origem_pdm="0182"
    valor_valido="DEFAULT=|SEM=0SEM|COM=00CT" conjunto="SIM" descricao="" />
  <caract codigoSE="a_fixacao_rolamento" valor="" origem_pdm="0340"
    valor_valido="DEFAULT=|SEM ANEL=0SEM|COM ANEL=" conjunto="SIM" />
</atributos>
</componente>
</componentes>
</bloco nome="DADOS_COMPONENTES">
</bloco nome="DADOS_MOTOR" entidade="i_motor">
</bloco nome="DADOS_GERAIS" entidade="d_geral">
</SEWEG version="1.0">
</?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
```

Figura A1.2 – Exemplo de arquivo .XML

A1.4 – Caso b) Erro na medida de prensagem do rotor

A regra “REGRA_NR_14AUXILIAR” corresponde ao caso 11 apresentado na Tabela 4.2 é detalhada no Quadro A1.1. Esta regra é adicionada na agenda de regras a partir do momento em que a máquina de inferência encontra o fato “verificar prensagem rotor sim”, além de verifica se os objetos tem valor definido para os atributos:

```
Objeto: ITEM_ROLAMENTO_DIANTEIRO atributo a_largura_rolamento
Objeto: ITEM_ROTOR_ENGAIOLADO atributo a_comprimento_pacote_chapas
Objeto: ITEM_CARACACA atributo a_comprimento_util
Objeto: ITEM_TAMPA_DIANTEIRA atributo a_profundidade_cubo_assento_rolamento
Objeto: ITEM_ROTOR_COMPLETO atributo a_medida_prensagem
```

Uma vez identificados todos os atributos necessários para determinar o valor da medida de prensagem, com base nos atributos (dimensões) de cada um dos objetos envolvidos, a regra executa, conforme Quadro A1.1, as seguintes ações:

Ação número 1) calcular o valor de ?MP conforme comando abaixo:

```
(bind ?MP (- (+ (/ (- ?comprutil ?comprpacote) 2) ?profrolam) ?largrol))
```

Ação número 2) armazenar o resultado do cálculo obtido na ação número 1, através do código abaixo, no atributo a_medida_prensagem do objeto motor.

```
(send (send [motor] get-a_medida_prensagem) put-dimensao ?MP)
```

Quadro A1.1 – Regra auxiliar para verificar a medida de prensagem

```

;-----
(defrule REGRA_NR_14AUXILIAR "verifica a medida de prensagem"
  (verificar prensagem rotor sim)
  ?atribaplic <-(object (is-a ATRIBUTO) (valor ?aplic&~000X))
  ?mot <-(object (is-a MOTOR) (a_aplicacao = (instance-name ?atribaplic)))
  ?atriblargrol <-(object (is-a ATRIBUTO) (dimensao ?largrol&~0.0))
  ?rolandia <-(object (is-a ?itE&ITEM_ROLAMENTO_DIANTEIRO) (a_largura_rolamento = (instance-
name ?atriblargrol)))
  ?atribpacote <-(object (is-a ATRIBUTO) (dimensao ?comprpacote&~0.0))
  ?roteng <-(object (is-a ?itRE&ITEM_ROTOR_ENGAIOLADO) (a_comprimento_pacote_chapas =
(instance-name ?atribpacote)))
  ?atribcompr <-(object (is-a ATRIBUTO) (dimensao ?comprutil&~0.0))
  ?carcaca <-(object (is-a ?itC&ITEM_CARACACA) (a_comprimento_util = (instance-name
?atribcompr)))
  ?atribprofrolam <-(object (is-a ATRIBUTO) (dimensao ?profrolam&~0.0))
  ?tpadia <-(object (is-a ?itTD&ITEM_TAMPA_DIANTEIRA) (a_profundidade_cubo_assento_rolamento
= (instance-name ?atribprofrolam)))
  ?atribmedprens <-(object (is-a ATRIBUTO) (dimensao ?medprens&~0.0))
  ?rotcompl <-(object (is-a ?itRC&ITEM_ROTOR_COMPLETO) (a_medida_prensagem = (instance-name
?atribmedprens)))
=>

  (bind ?MP (- (+ (/ (- ?comprutil ?comprpacote) 2) ?profrolam) ?largrol))
  (send (send [motor] get-a_medida_prensagem) put-dimensao ?MP)
)

```

O Quadro A1.2 apresenta o código fonte que dispara a regra REGRA_NR_14 uma vez que forem identificados os atributos de medida de prensagem para os objetos MOTOR e ITEM-ROTOR_COMPLETO.

Uma vez disparada a regra, é executado nas ações da regra um cálculo que determina se o valor do atributo `a_medida_prensagem` armazenado no objeto da Classe ITEM_ROTATOR_COMPLETO comparado com o valor calculado, armazenado nos atributos do motor, está dentro da faixa de tolerância mínima estabelecida, no caso 0.5 mm.

Quadro A1.2 – Regras para verificar a medida de prensagem

```

;----- (defrule
REGRA_NR_14 "verifica a medida de prensagem"
  (verificar prensagem rotor sim)
  ?atribmedprens <-(object (is-a ATRIBUTO) (dimensao ?medprens&~0.0))
  ?rotcompl <-(object (is-a ?itRC&ITEM_ROTATOR_COMPLETO) (a_medida_prensagem = (instance-name
?atribmedprens)))
  ?atribrcmedprens <-(object (is-a ATRIBUTO) (dimensao ?rcmedprens&~0.0))
  ?mot <-(object (is-a ?itM&MOTOR) (a_medida_prensagem = (instance-name ?atribrcmedprens)))
=>
  (bind ?valmin 0.5)
  (if (> (abs (- ?rcmedprens ?medprens )) ?valmin) then

;***** então está confirmado que a medida de prensagem não confere
  (bind ?msgerro1 (str-cat "A medida de prensagem = " ?medprens " do rotor completo" ))
  (bind ?msgerro2 (str-cat "não confere com o valor calculado = " ?rcmedprens ))
  (bind ?msgerro3 (str-cat "Verifique o valor da medida de prensagem ou as dimensões dos
itens abaixo: " ))
  (bind ?msgerro4 (str-cat "Comprim útil Carcaça: / pacote do rotor: / profund. rolamento
na tampa: / comprim. guia prensagem rolamento no eixo" ))
  (send ?rotcompl adiciona (instance-name ?rotcompl ) 14 ?msgerro1 ?msgerro2 ?msgerro3
?msgerro4)
  (assert (erro ?itRC(instance-name ?rotcompl )))
  )
)

```

A1.5 – Caso c) Erro de interferência de montagem entre eixo e rolamento

Esta regra se refere a um dos casos apresentado na Tabela 4.2 do Capítulo 4.

Quadro A1.3 – Regras para verificar assento rolamento

```

;-----
(defrule REGRA_NR_6
"verifica_diametro_assento_rolamento_traseiro_e_diametro_interno_rolamento_traseiro"
?atribdiameixo <-(object (is-a ATRIBUTO) (dimensao ?dimeixo&~0.0))
?eixo <-(object (is-a ?itE&ITEM_EIXO) (a_diametro_assento_rolamento_tras = (instance-name
?atribdiameixo)))
?atribdiamrol <-(object (is-a ATRIBUTO) (dimensao ?dimrol&~0.0&~?dimeixo))
?rol <-(object (is-a ?itR&ITEM_ROLAMENTO_TRASEIRO) (a_diametro_interno = (instance-name
?atribdiamrol)))
=>
;***** então os diâmetros estão com informações divergentes acima de 0.5mm
(if (> (abs(- ?dimeixo ?dimrol)) 0.5) then
  (bind ?msgerro1 (str-cat "Encontrado divergência entre diâmetro interno do rolamento
traseiro " ?dimrol ))
  (bind ?msgerro2 (str-cat "e o diâmetro do assento do rolamento no eixo = " ?dimeixo ))
  (bind ?msgerro3 (str-cat "Verifique se as dimensões estão corretas." ))
  (bind ?msgerro4 (str-cat "Caso necessário corrigir as dimensões no cadastro dos
componentes."))
  (if (eq (send (instance-name ?eixo) get-especial) SIM) then
    (send ?eixo adiciona (instance-name ?eixo) 6 ?msgerro1 ?msgerro2 ?msgerro3
?msgerro4)
    (assert (erro ?itE (instance-name ?eixo)))
  else
    (send ?rol adiciona (instance-name ?rol) 6 ?msgerro1 ?msgerro2 ?msgerro3 ?msgerro4)
    (assert (erro ?itR (instance-name ?rol)))
  ) )
) )

```

A1.6 – Exemplo de comandos utilizados em CLIPS para definição de classes

Para entender o código fonte é necessário conhecer a sintaxe (forma de escrever) e significado dos principais comandos utilizados na criação de uma classe conforme exemplo do Quadro .

Quadro A1.4 – Classe dados geral

```
-----  
;; DEFINE A CLASSE DADOS_GERAL - REGISTRA A UTILIZAÇÃO DO SE PELO USUÁRIO  
-----  
(defclass DADOS_GERAL      "Define Dados Gerais"      (is-a USER)(role concrete)  
(slot      login (type STRING)(default "")(create-accessor read-write))  
(slot      nome  (type STRING)(default "")(create-accessor read-write))  
(slot      ano   (type SYMBOL)(create-accessor read-write))  
(slot      mes   (type SYMBOL)(create-accessor read-write))  
(slot      dia   (type SYMBOL)(create-accessor read-write))  
(slot      hora  (type SYMBOL)(create-accessor read-write))  
(slot      minuto (type SYMBOL)(create-accessor read-write))
```

Comandos e funções, pela sintaxe do CLIPS, necessitam ser obrigatoriamente digitados em letras minúsculas.

- **defclass:** este é o construtor (código de programação) usado em CLIPS para definir uma classe.
- **DADOS_GERAL:** este é, no exemplo do Quadro 4.3, o nome da classe o qual é seguido por um texto explicativo entre aspas duplas.
- **is-a:** este é o código que faz a ligação entre a classe com sua classe superior. Neste caso a classe DADOS_GERAL está ligada com a classe USER.
- **role concrete:** esta é uma propriedade definida na classe e que faz com que se possa criar instâncias desta classe. Um objeto em CLIPS é uma instância de uma classe (GIARRATANO, 2002).
- **slot:** esta é a sintaxe(forma/ comando) utilizada para criar o atributo da classe.
- **(type SYMBOL):** esta é a sintaxe que define o tipo de atributo, se ele é SYMBOL, NUMBER, STRING, entre outros. O comportamento e as diferenças entre cada tipo são explicados por Giarratano (2002).
- **default:** permite definir um valor inicial para o atributo sempre que uma nova instância da classe é criada e nenhum valor específico é definido.

create-accessor read-write: em ingles é denominado um *facet*, ou seja, uma propriedade do atributo (slot) que faz com que o CLIPS entenda que deve ser criado as funções **get-** e **put-** para este slot quando definido em conjunto com **read** e **write**. Com isto não é necessário definir estas funções explicitamente no programa, pois o próprio CLIPS se encarrega de fazer.