



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA  
Pós-Graduação em Mestrado em Mecatrônica  
Escola Politécnica / Instituto de Matemática

**José Antônio Soares de Santana**

# **CONFIABILIDADE NO PROJETO CONCEITUAL DE PRODUTOS MECATRÔNICOS**

Salvador

2012

**José Antônio Soares de Santana**

**CONFIABILIDADE NO PROJETO CONCEITUAL DE  
PRODUTOS MECATRÔNICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Mestrado em Mecatrônica da Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Mecatrônica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Herman Augusto Lepikson

Salvador

2012

---

S232 Santana, José Antônio Soares de

Avaliação da confiabilidade em projeto conceitual visando a melhoria no desenvolvimento do projeto de produtos mecatrônicos / José Antônio Soares de Santana. – Salvador, 2012.

221 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Herman Augusto Lepikson

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2012.

1. Confiabilidade (Engenharia). 2. Projetos - Avaliação. 3. Mecatrônica. I. Lepikson, Herman Augusto. II. Universidade Federal da Bahia. III. Título.

CDD:620.00452

---

**José Antonio Soares de Santana**

# **CONFIABILIDADE NO PROJETO CONCEITUAL DE PRODUTOS MECATRÔNICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Mestrado em Mecatrônica da Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Mecatrônica.

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Herman Augusto Lepikson – Escola Politécnica - UFBA (Orientador)

---

Prof. Dr. Cristiano Vasconcellos Ferreira – Joinville - UFSC

---

Prof<sup>a</sup> Dra Aline Maria Santos Andrade – Instituto de Matemática - UFBA

Salvador - Ba

2012

Dedico essa dissertação a minha família,  
sentido da minha vida, com muito amor e carinho.

## **AGRADECIMENTOS**

Nessa caminhada eu não conseguiria atingir os objetivos se não contasse com a ajuda de várias pessoas que compartilharam comigo as minhas ansiedades e dúvidas.

Agradeço imensamente a Eliane Maria Simoni, Erundina Coelho Neta e Dr. Nilson Ribeiro que contribuíram muito com as suas experiências vivenciadas na área médica, solidificando mais ainda a importância das entrevistas com os usuários no desenvolvimento do projeto de um produto. A Paulo César e Moacir Dórea, pela disponibilização do seu tempo quando o procurei em um período de socorro.

Agradeço também ao orientador, o professor Herman Lepikson, que sempre acreditou e incentivou o desenvolvimento desse trabalho, dando as oportunidades necessárias para a sua conclusão. Não posso deixar de citar as contribuições de outras pessoas amigas, como Justino Medeiros, Andréa Bitencourt, Rosana Almeida e Adilson Sampaio, que sempre incentivaram nos momentos de dúvidas e apreensões.

Finalmente, agradeço o meu filho Leonardo, com suas orientações para a compreensão dos textos em inglês possibilitando a evolução do conhecimento estudado e, ao colega Alexandre Franco que foi bastante decisivo no fechamento desse trabalho com sua larga experiência na área da ciência da computação. A minha esposa Ly e a minha filha Thiana sempre firme e convicta nas suas opiniões. Também estendo os agradecimentos a Luciano, Ceica, Marcus e Lilian.

Agradeço a Nossa Senhora de Fátima e ao Senhor do Bomfim que, no fundo da minha alma, me fizeram acreditar o quanto é importante ter fé.

### *Epígrafe*

Quando os gansos selvagens voam em formação "V", eles o fazem a uma velocidade 70% maior do que se estivessem sozinhos. Eles trabalham em Equipe. Sendo parte de uma equipe nós podemos utilizar adequadamente os recursos disponíveis e compartilhar as tarefas difícil em uma direção comum. (<http://www.vaiarrebentar.com.br/o-vo-dos-gansos-selvagens/#axzz1fWUyCw5l>)

## RESUMO

A confiabilidade aumenta o desempenho do produto mecatrônico e, sua avaliação em geral, se constitui uma prática restrita à fase de projeto detalhado, sendo, poucas vezes, aplicada nas fases precedentes, sobretudo a fase de projeto conceitual, caracterizada por um elevado nível de abstração. No desenvolvimento do projeto conceitual é importante a utilização de uma linguagem abrangente, que possibilite a compreensão e sinergia em todos os domínios da mecatrônica. Por exemplo, a linguagem de orientação a objeto, muito utilizada no desenvolvimento de software, não atende o domínio da engenharia de controle. Diante dessa lacuna, a presente pesquisa objetivou introduzir um método abrangente a todos os domínios da mecatrônica, para elaboração do projeto conceitual, com avaliação da confiabilidade dos conceitos selecionados. O método proposto utiliza uma linguagem abrangente, proporcionando uma compreensão entre todos os domínios da mecatrônica, a exemplo do mecânico, eletrônico, software e controle. Avaliando as falhas funcionais em potencial, dos conceitos selecionados, é possível eliminar aqueles tidos como não confiáveis, impedindo sua passagem para a fase de projeto detalhado e, com isso, promovendo ganhos representativos no desempenho do processo de projeto. Como forma de avaliar o método, foi proposto sua aplicação em um estudo de caso, o desenvolvimento de um dispositivo mecatrônico para auxiliar a remoção de pacientes da cama-leito para a maca em hospitais. Como resultado, a experiência revelou que o método pode ser eficaz na avaliação da confiabilidade na fase de projeto conceitual e a sua linguagem abrangente facilita a compreensão e conhecimento de todos os especialistas envolvidos, criando uma sinergia entre os domínios da mecatrônica.

Palavras-chave: Confiabilidade, Projeto Conceitual, Produto Mecatrônico.



## **ABSTRACT**

The reliability increases the performance of mechatronic products. Its evaluation, in general, is a practice restricted to the detailed design phase, and it is rarely applied in the previous phases, especially the conceptual design phase, which has a high level of abstraction. In developing the conceptual design it is important to use a comprehensive language, enabling understanding and synergy in all domains of mechatronics. For example, object-oriented language, commonly used in software development, does not meet the field of control engineering. Given this gap, this study aimed to introduce a comprehensive approach to all areas of mechatronics, for preparation of the conceptual design, assessing the reliability of the selected concepts. The proposed method uses a comprehensive language, providing an understanding among all domains of mechatronics, such as mechanical, electronic, software and control. Assessing the potential functional failures of the concepts selected, one can eliminate those concepts deemed unreliable, preventing their advance to the phase of detailed design and therefore promoting representative gains in performance of the design process. In order to evaluating the method, its application was proposed in a case study: the development of a mechatronic device to aid the transfer of patients from bed to the stretcher in hospitals. As a result, the experience has shown that the method can be effective in assessing the reliability of the conceptual design phase and its comprehensive language facilitates understanding and knowledge of all the experts involved, creating a synergy between the domains of the mechatronics.

Keywords: Reliability, Conceptual Design, mechatronic products

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- CPCPM – Confiabilidade no Projeto Conceitual de Produtos Mecatrônicos
- ADC - *Analogic Digital Converter* - Conversor Analógico - Digital
- CAE - *Computer Aided Engineering* (Engenharia Auxiliada por Computador)
- CAD - *Computer Aided Design* (Projeto Auxiliado por Computador)
- CAM - *Computer Aided Manufacturing* (Manufatura Auxiliada por Computador)
- CAPP - *Computer Aided Process Planning* (Planejamento e Processo Auxiliado por Computador)
- CCF – *Common Cause Failure* – Falha de causa comum.
- CF - *Component – Failure Matrix* (Matrix Componente – Falha)
- CFR - *Constant Failure Rate* (Taxa de Falha Constante)
- CPU - *Computer Process Unit* (Unidade Processamento Computador)
- DAC - Conversor Digital - Analógico
- DAL - *Development Assurance Level* (Rigor de Garantia de Desenvolvimento)
- DFR - *Decreasing Failure Rate* (Taxa Falha Decrescente)
- DVD - *Digital Video Disc* ( Disco Digital de Video)
- EC - *Function – Component Matrix* (Matriz Função Componente)
- ECC - *Execution Control Chart* (Gráfico Controle Execução)
- EF - *Function – Failure Matrix* (Matriz Função – Falha)
- FB - *Functions Blocks* (Blocos de Funções)
- FHA - *Failure Hazop – Hazard and Operability Study – Analysis* ( Análise de Risco da falha )
- FTA - *Failure Tree Analysis* (Análise de Árvore de Falha)
- F(t) - Função Distribuição Cumulativa ou Função Não Confiabilidade
- f(t) - Função Densidade de Probabilidade
- IFR - *Increasing Failure Rate* (Taxa Falha Crescente)
- IIT - Índice de Importância Técnica

- h(t) - Taxa de Risco de Falha
- IHM - Interface Homem Máquina
- MdpM - Metodologia do produto mecatrônico
- MTBF - *Mean Time Between Failure* (Tempo Médio entre Falhas)
- MTTF - *Mean Time To Failure* (Tempo Médio até a Falha)
- NC - Necessidades do cliente
- NP - Número Prioridade
- PLC - *Programmable Logic Controller* (Controlador Lógico Programável)
- QFD - *Quality Function Deployment* (Matriz da casa da qualidade)
- RAM - *Reliability, Availability and Maintainability* (Confiabilidade, Disponibilidade e Manutenibilidade)
- R(t) - Função Confiabilidade
- SLC - *Software Life Cycle* (Ciclo Vida de Software)
- SSCs - Sistemas, Subsistemas e Componentes
- UCM - Unidade de Controle da Maca
- UML - *Unified Modeling Language* (Linguagem Unificada de Modelagem)
- VCR - *Video Cassete Recorder* (Gravador Video Cassete)
- $\lambda(t)$  - Taxa de Falha
- $\theta(t)$  - *Mean Life* (Vida Média)

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### QUADROS

Quadro 1 – Modos e mecanismo de falhas do circuito integrado	39
Quadro 2 – Modos de falha funcional na CPU	41
Quadro 3 – Modos de falha de entrada de dados	50
Quadro 4 – Modos de falha de entrada de arquivo	50
Quadro 5 – Modos de falha de software no nível de sistema	51
Quadro 6 – Grau de relacionamento entre requisitos de engenharia e necessidades do cliente	59
Quadro 7 – Escala de critério de severidade (S)	74
Quadro 8 – Escala de frequência de ocorrência de falhas (F)	74
Quadro 9 – Escala de detecção de falhas (D)	75
Quadro 10 – Exemplo esquemático da matriz função - componente	77
Quadro 11 – Proposta de atribuição de DAL para o setor automotivo	82
Quadro 12 – Grau de importância das necessidades dos clientes	89
Quadro 13 – Fator de relacionamento	91
Quadro 14 – Necessidades dos clientes consolidadas	110
Quadro 15 – Descrição dos sensores e atuadores	120
Quadro 16 – Subfunções do modelo funcional	136

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### FIGURAS

Figura 1 – Fluxo de energia e informação no produto mecatrônico	20
Figura 2 – Malha de controle de um produto mecatrônico	23
Figura 3 – Taxa de risco como uma função da idade	31
Figura 4 – Diagrama de blocos da configuração em série	32
Figura 5 – Diagrama de blocos da configuração em paralelo	33
Figura 6 – Comunicação no sistema de computador	41
Figura 7 – Modelo de falhas de software	46
Figura 8 – Processo de desenvolvimento de projeto	55
Figura 9 – O modelo Kano de satisfação do cliente	57
Figura 10 – A matriz casa da qualidade	59
Figura 11 – Representação esquemática da função global	61
Figura 12 – Modelo caixa – preta	61
Figura 13 – Representação gráfica do bloco de função (FB) da IEC-61499	66
Figura 14 – A aplicação de controle como uma rede de ocorrências de blocos de funções (FB) interconectados	66
Figura 15 – Exemplo de matriz morfológica	67
Figura 16 – Entidades de grupo e ligações entre elas	70
Figura 17 – Condições para a falha	71
Figura 18 – Avaliação do critério de severidade	73

Figura 19 – Método função – falha	76
Figura 20 – Metodologia MdpM	79
Figura 21 – Visão geral do modelo V	81
Figura 22 – O método CPCPM	85
Figura 23 – Exemplo da matriz casa da qualidade (QFD)	90
Figura 24 – Modelo caixa - preta	92
Figura 25 – O hardware do produto mecatrônico	97
Figura 26 – Exemplo de fluxo na base funcional	99
Figura 27 – Exemplo geral da matriz morfológica	101
Figura 28 – Matriz componente - falha	103
Figura 29 – Exemplo de matriz componente - custo	104
Figura 30 – Matriz morfológica do <b>conceito_1</b> selecionado	105
Figura 31 – Matriz função – falha do <b>conceito_1</b>	105
Figura 32 – Resumo dos conceitos selecionados	106
Figura 33 – Matriz casa da qualidade	112
Figura 34 – Modelo caixa – preta	114
Figura 35 – Árvore funcional	116
Figura 36 – Caso de uso transladar plataforma (sair)	118
Figura 37– Diagrama simplificado do sistema mecatrônico	119
Figura 38 – Diagrama de casos de uso	121
Figura 39 – Diagrama de interação do caso de uso nivelar plataforma	123
Figura 40 – Diagrama de classe do sistema mecatrônico	125
Figura 41 – Statechart nivelar plataforma	127

Figura 42 – Malha de controle do nivelamento da plataforma	129
Figura 43 – Bloco de função CTUD da IEC- 61499	130
Figura 44– Modelo funcional específico	134
Figura 45 – Modelo funcional do produto mecatrônico	135
Figura 46 – Matriz morfológica do produto mecatrônico	137
Figura 47 – Matriz componente - falha	139
Figura 48 – Matriz componente – custo	141
Figura 49 – Matriz morfológica do <b>conceito_2</b>	142
Figura 50 – Resumo dos conceitos selecionados(quantidade de falhas)	143
Figura 51– Resumo dos conceitos selecionados(número prioridade)	144

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b>	17
<b>1 PRODUTO MECATRÔNICO E CONFIABILIDADE</b>	19
1.1 PRODUTO MECATRÔNICO	19
1.2 CONFIABILIDADE	24
<b>1.2.1 Conceitos de Confiabilidade</b>	27
<b>1.2.2 Modelagem de Falhas</b>	30
<b>2 MODOS DE FALHA NO DOMÍNIO DA MECATRÔNICA</b>	35
2.1 MODOS DE FALHAS NO DOMÍNIO MECÂNICO	36
2.2 MODOS DE FALHAS NO DOMÍNIO ELETRÔNICO	38
2.3 MODOS DE FALHAS NO DOMÍNIO DO SOFTWARE	44
2.4 MODOS DE FALHAS EM SENSORES E ATUADORES	51
<b>3 PROJETO DE PRODUTO</b>	55
3.1 PROJETO INFORMACIONAL	56
3.2 PROJETO CONCEITUAL	60
<b>3.2.1 Software e Lógica de Controle do Produto Mecatrônico</b>	63
3.3 PROJETO DETALHADO	68
<b>4 ABORDAGENS DE CONFIABILIDADE</b>	69
4.1 MODELAGEM DO CONCEITO DE PROJETO PARA MELHORIA DA CONFIABILIDADE	69
4.2 NÚMERO PRIORIDADE (NP)	71
4.3 MÉTODO FUNÇÃO – FALHA	75
4.4 METODOLOGIA MdpM	78
4.5 MÉTODO FREITAS	80
<b>5 O MÉTODO CPCPM</b>	85
5.1 PROJETO INFORMACIONAL	86
<b>5.1.1 Levantamento das Necessidades dos Clientes (NC)</b>	88
<b>5.1.2 Definição dos Requisitos Técnicos do Produto</b>	90
5.2 PROJETO CONCEITUAL	92
<b>5.2.1 Modelo Caixa – Preta</b>	92
5.2.1.1 Modelagem no Domínio Mecânico	93
5.2.1.2 Modelagem no Domínio do Software	95



5.2.1.3 Modelagem no Domínio do Controle	96
5.2.1.4 Modelagem no Domínio Eletrônico	97
5.2.1.5 Modelagem de Sensores e Atuadores	98
<b>5.2.2 Modelo Funcional do Produto Mecatrônico</b>	<b>99</b>
<b>5.2.3 Construção das Alternativas de Projeto</b>	<b>100</b>
<b>5.3 AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE NO PROJETO CONCEITUAL</b>	<b>102</b>
<b>5.3.1 Matriz Componente – Falha</b>	<b>102</b>
<b>5.3.2 Matriz Componente - Custo</b>	<b>103</b>
<b>5.3.3 Seleção de Conceitos</b>	<b>104</b>
<b>6 ESTUDO DE CASO</b>	<b>108</b>
6.1 PROJETO INFORMACIONAL	108
<b>6.1.1 Levantamento das Necessidades dos Clientes (NC)</b>	<b>109</b>
<b>6.1.2 Definição dos Requisitos Técnicos do Produto</b>	<b>111</b>
6.2 PROJETO CONCEITUAL	113
<b>6.2.1 Modelo Caixa – Preta</b>	<b>113</b>
6.2.1.1 Modelagem no Domínio Mecânico	114
6.2.1.2 Modelagem no Domínio de Software	120
6.2.1.3 Modelagem no Domínio do Controle	126
6.2.1.4 Modelagem no Domínio Eletrônico	131
6.2.1.5 Modelagem de Sensores e Atuadores	132
<b>6.2.2 Modelo Funcional do Produto Mecatrônico</b>	<b>133</b>
<b>6.2.3 Construção das Alternativas de Projeto</b>	<b>136</b>
6.3 AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE NO PROJETO CONCEITUAL	138
<b>6.3.1 Matrix Componente – Falha</b>	<b>138</b>
<b>6.3.2 Matriz Componente – Custo</b>	<b>140</b>
<b>6.3.3 Seleção de Conceitos</b>	<b>141</b>
<b>7 CONCLUSÃO</b>	<b>145</b>
7.1 LIMITAÇÃO DO MÉTODO	147
7.2 RECOMENDAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS	147
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>149</b>
<b>APÊNDICE</b>	<b>153</b>
<b>ANEXO</b>	<b>215</b>

## INTRODUÇÃO

Produtos mecatrônicos são sistemas integrados compostos de componentes mecânicos, sensores e atuadores, apoiados na eletrônica digital, e que se objetivam ao processamento da informação através de software e algoritmos de controle.

Um produto dessa natureza é, em geral, complexo e tem caráter multidisciplinar, já que envolve os domínios da mecânica, eletrônica digital e o processamento da informação, compreendendo os domínios específicos da engenharia de software e engenharia de controle. Sua principal vantagem é conseguir executar tarefas automatizadas com menor interferência do homem.

Assim como qualquer outro produto, os de origem mecatrônica se relacionam com o conceito de confiabilidade, que consiste na probabilidade do produto desempenhar satisfatoriamente as funções para as quais foi projetado, durante um determinado período de tempo, e sob condições especificadas. Quanto mais elevada for a confiabilidade de um produto, maior será a certeza de que irá atender às expectativas daqueles que o utilizam.

Em geral, o cálculo da confiabilidade do produto é realizado na fase de projeto detalhado – a fase seguinte ao projeto conceitual –, uma vez que nesta a materialização do produto já está consolidada, permitindo a obtenção de dados de falhas dos componentes envolvidos. Poucas vezes se investiu no cálculo da confiabilidade na fase de projeto conceitual, certamente pelo alto nível de abstração que a caracteriza, ou seja, o que se tem é a ideia das funções que o produto deve desempenhar, sendo difícil calcular a confiabilidade do produto.

Entretanto, na seleção dos conceitos que irão nortear os componentes que serão utilizados mais adiante no projeto detalhado, é possível avaliar as falhas funcionais em potencial de cada conceito e, a partir disto, eliminar aqueles não confiáveis, que sinalizam uma baixa confiabilidade do produto. Sendo assim, pode-se poupar tempo dos projetistas na realização de grandes revisões de projeto na fase de projeto detalhado e, ao mesmo tempo, direcionar as medidas preventivas capazes de mitigar as falhas funcionais as quais o produto estará passível.

Além disso, apesar do custo na fase de projeto conceitual ser baixo – cerca de cinco por cento do custo do projeto do produto –, decisões inadequadas tomadas nessa fase podem impactar fortemente o custo de desenvolvimento do produto,

incluindo a manufatura, podendo chegar até oitenta por cento (GOEL, GRAVES, 2007).

Diante da importância do projeto conceitual, esta pesquisa propõe-se a introduzir um método para elaboração do projeto conceitual de produtos mecatrônicos, utilizando uma linguagem simples e de fácil aplicação, capaz de permitir a compreensão e integração do conhecimento de todos os multidomínios envolvidos, e que apresente uma abordagem de avaliação da confiabilidade. Para atingir esse objetivo, o trabalho cumpriu as seguintes etapas:

- a) Realizar o levantamento da literatura recente ligada à área de produto mecatrônico, à fase de projeto conceitual e aos aspectos de confiabilidade que são utilizados na elaboração do projeto de um produto, e a modelagem de falhas nos domínios do produto mecatrônico;
- b) Descrever o método para elaboração do projeto conceitual de produto mecatrônico e introduzir, neste, aspectos de confiabilidade;
- c) Comprovar a aplicabilidade do método proposto na avaliação de um estudo de caso.

As considerações relacionadas ao assunto em questão estão distribuídas entre sete capítulos, que integram o texto dissertativo. Os capítulos de 1 a 4 apresenta a revisão da literatura que possibilitou o acesso aos conceitos necessários ao desenvolvimento da pesquisa e análise de dados. O Capítulo 1 descreve o produto mecatrônico e os conceitos de confiabilidade, dando uma visão do assunto. O Capítulo 2 descreve os principais modos de falhas no domínio mecatrônico, mostrando como sua confiabilidade pode ser afetada. O Capítulo 3 mostra a metodologia para elaboração do projeto de um produto para conhecimento e entendimento das fases de desenvolvimento de projeto e o Capítulo 4 oferece algumas abordagens utilizadas na tentativa de inserir confiabilidade em projeto conceitual. No Capítulo 5, é apresentado o método CPCPM proposto e, no Capítulo 6, é detalhado o estudo de caso. Finalmente, no Capítulo 7, é exposta uma síntese dos resultados e as conclusões possibilitadas pela pesquisa desenvolvida, seguidas de sugestões para trabalhos futuros.

## 1 PRODUTO MECATRÔNICO E CONFIABILIDADE

É praticamente impossível entender a questão da confiabilidade de um produto mecatrônico, sem se ter em mente a sua própria definição, suas características e especificidades. Nesse sentido, a discussão sobre confiabilidade, que destacará sua importância na medida do desempenho de um produto, será precedida de uma descrição do produto de natureza mecatrônica.

Na abordagem do tema da confiabilidade, serão apresentados os principais conceitos e detalhado a modelagem de falhas, no intuito de permitir a compreensão dos modos de falhas dos componentes do produto.

### 1.1 PRODUTO MECATRÔNICO

O produto mecatrônico consiste em uma combinação sinérgica de mecânica de precisão, controle eletrônico e sistemas inteligentes para o desempenho das funções mecânicas. Um exemplo prático é a suspensão inteligente de um caminhão que se ajusta para manter a plataforma nivelada, quando submetida a um carregamento irregular.

A estrutura física do produto mecatrônico está no domínio mecânico e, através do fluxo de material e energia, ocorre um fluxo de informação através de sinais pelo domínio eletrônico, que capacita uma variedade de funções automatizadas e controladas no domínio do software.

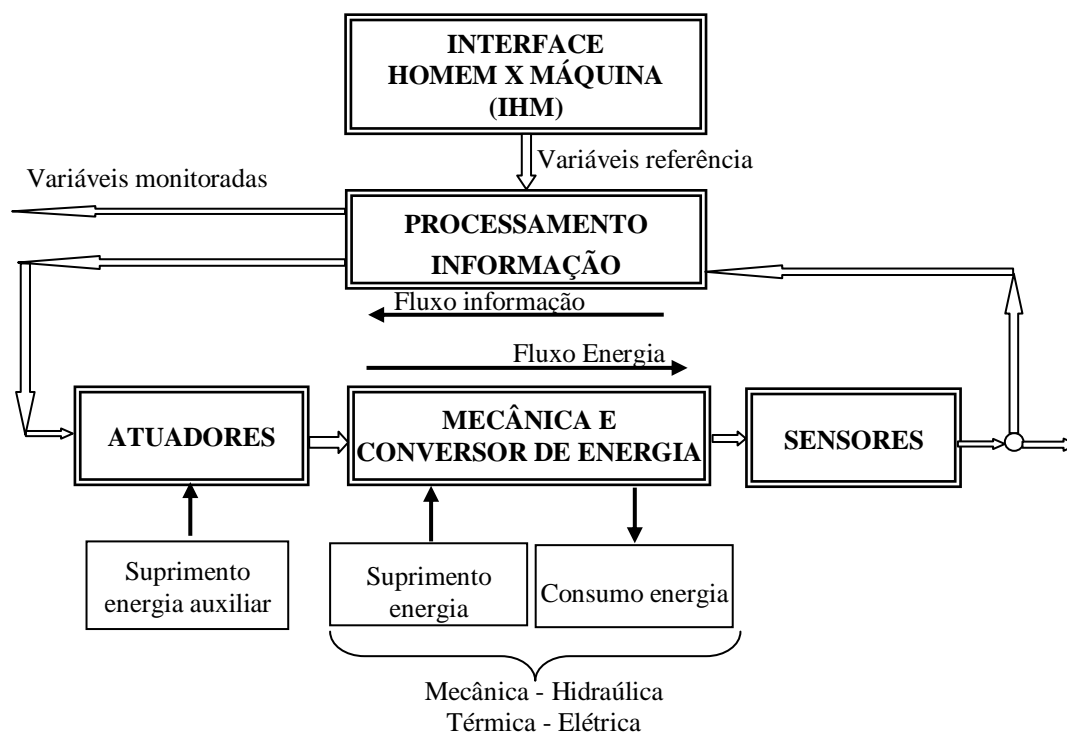
O objetivo da maioria dos sistemas eletrônicos, de acordo com Onwubolu (2005), é medir ou controlar alguma grandeza física, o que se faz mediante a aquisição de dados do ambiente, processamento e armazenamento na memória. Atuando como um sistema de controle, também terá de interagir com o ambiente. O fluxo de informação em um típico sistema de aquisição de dados pode ser descrito conforme os seguintes estágios:

- a) Os sensores ou transdutores de entrada medem alguma propriedade física do ambiente;
- b) O sinal de saída dos sensores é condicionado, através de amplificadores, filtros, etc;

- c) O sinal analógico condicionado é digitalizado, usando um conversor analógico-digital (ADC);
- d) A informação digital é adquirida, processada e gravada pelo computador ou microcontrolador;
- e) O computador ou microcontrolador pode, então, modificar o ambiente pelos sinais de controle. Para que isso ocorra, os sinais de controle digital são convertidos para sinais analógicos usando um conversor digital-analógico (DAC);
- f) Os sinais analógicos são condicionados através de amplificadores, filtros, etc, apropriados para um transdutor de saída;
- g) Os atuadores ou transdutores de saída interagem com o ambiente.

Em um sentido amplo, o produto mecatrônico é composto de hardware e software (Figura 1).

Figura 1 – Fluxo de energia e informação no produto mecatrônico



Fonte: (ISERMANN, 2000)

O hardware constitui-se de componentes mecânicos, eletrônicos, sensores e atuadores, e de componentes digitais, que formam o computador ou microcontrolador, todos integrados compondo uma unidade única. Já o software, responsável pelo processamento da informação, envolve teoria de sistemas, automação e controle, engenharia de software e inteligência artificial.

A informação sobre o estado do processo mecânico que gera movimentos ou transferência de força ou torque pode ser obtido do fluxo, tal como velocidade, volume ou massa, corrente elétrica, ou do esforço, a exemplo de força, pressão, temperatura, tensão elétrica, etc. Estes sinais medidos constituem a base do processo informacional em um sistema digital, operando sob condição de tempo real. Junto com as variáveis de referência, as variáveis medidas são entradas para o processamento da informação, na eletrônica digital, resultando em ações de controle na manipulação de variáveis pelas ações dos atuadores.

A integração dos componentes de hardware resulta do projeto do sistema mecatrônico como um sistema global, com incorporação de sensores, atuadores e microcomputadores ou microcontroladores dentro do processo mecânico. Sensores e microcontroladores integrados conduzem a sensores inteligentes, da mesma forma atuadores com microcontroladores integrados evoluem para atuadores inteligentes.

A integração do software se baseia no processamento da informação digital, principalmente em funções avançadas de controle, como por exemplo, cálculos de variáveis não mensuráveis, adaptação dos parâmetros do controlador, detecção e diagnóstico de falhas e reconfiguração para componentes redundantes tolerantes a falhas. Portanto, os sistemas mecatrônicos são capazes de evoluir para um comportamento adaptativo, ou mesmo de aprendizagem, o que, como afirma Isermann (2000), lhes permite ser chamados de sistemas mecatrônicos inteligentes.

Os sistemas mecatrônicos contêm componentes principais de funcionamento, responsáveis pela implementação dos efeitos físicos mais importantes, e também componentes de apoio ao funcionamento, relacionados aos subsistemas, tais como: sistema de entrada e saída (I/O), sensores, atuadores, sistema supervisor, etc. Os componentes principais de funcionamento diferem entre si de acordo com o produto mecatrônico, enquanto os componentes de apoio ao funcionamento são frequentemente similares em nível funcional na maioria deles (ZANG et al, 2003).

A existência de um defeito na concepção do projeto dos componentes principais de funcionamento poderá comprometer o desempenho do produto mecatrônico. Isso se dará mesmo diante do desempenho satisfatório dos componentes de apoio ao funcionamento.

O fluxo de material acontece por meio dos componentes principais de funcionamento, enquanto os fluxos de energia e informação são a ligação entre a função principal e todas as funções de apoio. O fluxo de energia é requerido para manter o sistema funcionando, enquanto o fluxo de informação é utilizado para processar o sistema corretamente, incluindo o sistema de controle computadorizado.

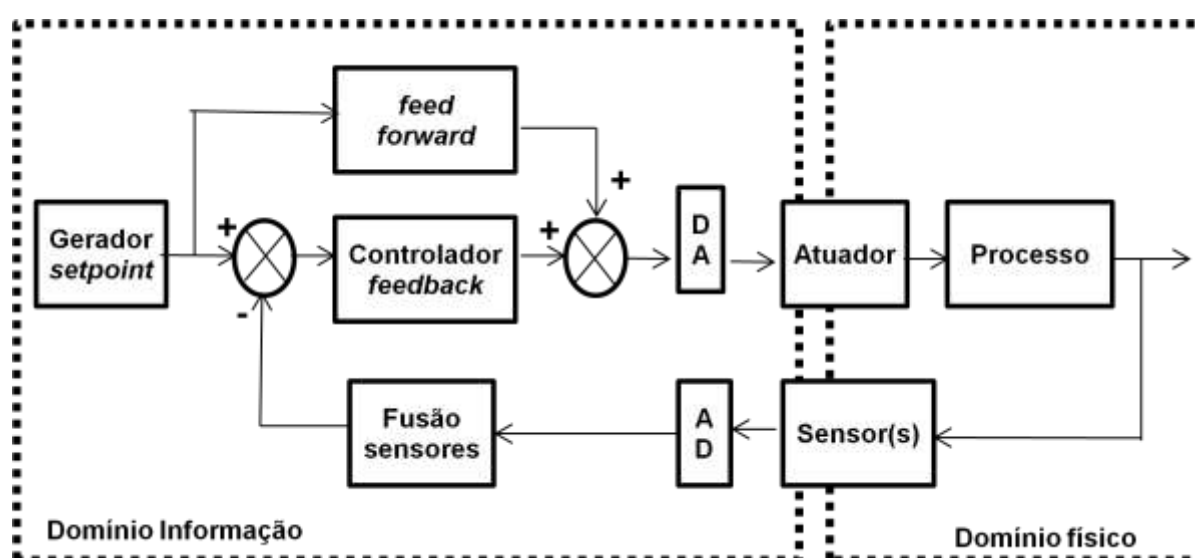
Um produto mecatrônico funciona como se fosse uma unidade independente e envolve a aquisição de informação direta do ambiente em que está inserido. Caso essas informações falhem, o processamento também falhará, comprometendo o controle do produto. As ações de controle clássicas podem ser realizadas em três categorias: proporcional, integral e derivativa. A ação proporcional atua na correção do desvio (erro), entre a variável medida e a variável de referência. A ação integral, por sua vez, tem a finalidade de eliminar o erro de *offset* persistente na ação proporcional, quando ocorre a variação de demanda. A ação derivativa é antecipatória atuando na velocidade de variação do desvio. Portanto, as informações recebidas pelo sistema de controle, oriundas dos sensores, são muito importantes para o seu desempenho.

Em termos de confiabilidade, a utilização de sensores confiáveis é fundamental para a operação do produto mecatrônico, ao longo do seu ciclo de vida, assim como a interação desses sensores com o ambiente em que está inserido o produto. Ambientes instáveis que ocasionam, por exemplo, um nível de vibração acentuado ou que possuem partículas sólidas em suspensão ou variações de temperaturas, podem afetar consideravelmente o desempenho dos sensores.

A malha de controle que caracteriza um produto mecatrônico é ilustrada na figura 2. Nela, pode ser observada a importância dos sensores e atuadores, os quais são transportadores de ações e sensibilidade entre o domínio físico e o da informação. A fusão de sensores decorre da combinação de dados sensoriais de diferentes fontes, e que tem a finalidade de tornar a qualidade da informação melhor do que a que geraria caso estivessem sendo utilizadas individualmente.

Os sensores em geral transduzem os sinais, convertendo, por exemplo, movimentos mecânicos, temperatura ou pressão, em sinais elétricos, e através de um conversor analógico para digital e amplificadores de potência, os sinais de alimentação são modulados e digitalizados. Na maioria dos casos, o fornecimento é de energia elétrica, mas outras fontes, como energia hidráulica e pneumática, também são possíveis.

Figura 2 – Malha de controle de um produto mecatrônico



Fonte: (AMEROGEN, BREEDVELD, 2003)

Outro aspecto importante é o desempenho dos atuadores. Se as determinações enviadas pelo controlador não são executadas adequadamente pelos atuadores, o desempenho da malha de controle é comprometido. Nesse sentido, ter atuadores confiáveis ao longo do seu ciclo de vida torna-se indispensável para a confiabilidade do produto mecatrônico.

O controlador envia sinais processados para os atuadores baseado em controle antecipatório (*feedforward*) e controle por retroalimentação através das informações enviadas pelos sensores (*feedback*). Desse modo, um produto mecatrônico deve ter uma interface baseada em sinal, a fim de enviar e receber informações de sincronização e de bloqueio, ao invés de uma interface baseada em operação, como acontece com os objetos de software puro (BONFÉ, FANTUZZI,



2003). Na prática, a parte de software do objeto mecatrônico deve ser um módulo reutilizável do programa de controle da máquina, constituído de:

- a) Uma interface de entrada/saída de sinais e parâmetros de dados, que permite a interação e sincronização com o resto do sistema de controle;
- b) Uma interface de entrada/saída de informação sensorial e comandos de atuadores requerido para controlar a parte física do sistema mecatrônico. Essa interface deve ser considerada uma parte privada do sistema mecatrônico;
- c) Um conjunto de dados privados para armazenar a informação de estado;
- d) Um algoritmo de controle que determina o comportamento dinâmico do conjunto mecatrônico, a fim de atender aos requisitos funcionais.

## 1.2 CONFIABILIDADE

A confiabilidade, tal como esclarece Dhillon (1999), é definida como a probabilidade que um produto possui de desempenhar suas funções em um determinado período de tempo, sob condições especificadas. Quando a taxa de falha é constante, como acontece com a maioria dos componentes eletrônicos, o cálculo da confiabilidade é simplificado e pode ser obtido pela fórmula abaixo, onde  $R(t)$  é a confiabilidade no tempo  $t$ ,  $\lambda$  é a taxa de falha constante e  $t$  é o período de tempo avaliado.

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1)$$

Esta definição é usualmente aplicável para os itens que têm missão simples, por exemplo, equipamento único, veículos simples ou componentes de produtos. Para produtos complexos, a exemplo de sistemas mecatrônicos, é apropriado usar conceitos mais elaborados, como por exemplo, “a efetividade do produto”. (DEPARTMENT OF THE ARMY, 2007).

A efetividade do produto é a habilidade deste alcançar um conjunto de requisitos específicos em sua missão, como no caso de um satélite. Ela é uma função da disponibilidade e sucesso da missão ou o que é chamado de Confiança (*Dependability*). O custo e o tempo são críticos na avaliação do produto e seus

componentes, e devem eventualmente ser incluídos nas decisões administrativas de fabricação, aquisição, operação, manutenção e descarte. A efetividade operacional é influenciada pela maneira como o produto foi projetado e construído. Também é influenciada pela maneira como o produto é utilizado e mantido (AVIZIENIS, LAPRIE, RANDELL, 2001).

A confiabilidade do produto é determinada na fase de projeto detalhado, onde o nível de abstração é reduzido e, conseqüentemente, a materialização do produto é acentuada. Nessa fase, é mais fácil a obtenção de dados de falhas dos componentes selecionados. Na determinação da confiabilidade, segundo o *Department of the Army* (2007), as tarefas incluem:

- a) Estabelecimento e definição dos requisitos de confiabilidade, usando catálogos/guias/padrões de confiabilidade de projeto;
- b) Predição e modelagem da confiabilidade;
- c) Monitoração das atividades de confiabilidade de fornecedores e subcontratados;
- d) Execução da análise crítica dos modos e efeitos de falhas;
- e) Monitoração do aumento-decréscimo da confiabilidade;
- f) Avaliação da confiabilidade do software;
- g) Classificação dos agressores ambientais;
- h) Preparação de uma lista de itens críticos;
- i) Execução da análise e tolerância dos circuitos e partes eletrônicas.

Para os especialistas em Confiabilidade, Disponibilidade e Manutenibilidade – RAM – (*Reliability, Availability and Maintainability*), a teoria da confiabilidade é fundamentada na matemática da probabilidade e estatística. A razão para uso deste conceito é a inerente incerteza na predição de uma falha. Dado um modelo de falha baseado em reações físicas ou químicas, o resultado não é o tempo em que uma parte falha, mas, a probabilidade de uma dada parte falhar em um tempo especificado. A curva da confiabilidade *versus* tempo é, genericamente, uma curva decrescente, ou seja, com o passar do tempo, ocorrem desgastes ou degradação

dos sistemas que elevam a probabilidade de falhas (DEPARTMENT OF THE ARMY, 2007).

Deve-se esclarecer que existe uma diferença entre defeito e falha. O defeito é uma ocorrência fora do normal dentro do especificado ou esperado, mas que pode não ter se manifestado por falta de uso e, com isso, não compromete o desempenho do produto ou sistema. A falha, por sua vez, é uma manifestação do defeito, ou seja, uma reação perceptível do defeito existente em parte ou no todo do produto ou sistema. Uma das atividades mais importantes da manutenção preventiva, cujo objetivo é aumentar a confiabilidade do produto ou sistema ao longo do seu ciclo de vida, é programar atividades para diagnosticar e conhecer os possíveis defeitos antes de ocorrerem suas primeiras manifestações.

Na fase de projeto conceitual, em que o nível de abstração é elevado e ainda não se tem a materialização do produto, não é aplicável a utilização de ferramentas usuais de detecção e avaliação da confiabilidade do produto, fundamentadas em modelos estatísticos. Entretanto, é possível fazer uma análise qualitativa, com base no modelo funcional e nas definições dos Sistemas, Subsistemas, Componentes (SSCs), na busca da revelação de possíveis falhas funcionais em potencial que possam vir a ser experimentadas pelo produto.

Esta medida pode ser extremamente útil, considerando que o custo das modificações é insignificante para alteração da concepção do produto em desenvolvimento. Além disso, devem ser evitadas as falhas funcionais em potencial para que não se tornem persistentes nas fases seguintes de projeto e, no final, comprometam a confiabilidade do produto.

No caso de um produto mecatrônico, em que ele desempenha suas funções de maneira integrada nos domínios da mecânica, eletrônica, software e controle, isto é importante, uma vez que as falhas que ocorrem em um domínio podem interferir nos demais. Assim, a descoberta de falhas funcionais em potencial no projeto conceitual propiciará uma sinergia de informação e integração entre os engenheiros, com o objetivo de aumentar a confiabilidade do produto.

### 1.2.1 Conceitos de Confiabilidade

A identificação de um valor de não confiabilidade, quando comparada com a de confiabilidade, mostra-se mais fácil porque depende da probabilidade de ocorrência de uma falha. Com isso, a confiabilidade é medida pela subtração da não confiabilidade, uma vez que o somatório das duas é igual a um. Consoante com Dhillon (1999), a função confiabilidade  $R(t)$  é a probabilidade que um serviço possui de não falhar anteriormente em um tempo  $t$ . Sua obtenção é feita a partir da seguinte fórmula:

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_0^{\infty} f(t)dt \quad (2)$$

Onde  $f(t)$  é a função densidade de probabilidade e  $F(t)$  é a função distribuição cumulativa, também chamada de função não confiabilidade que é a expressão da falha. A probabilidade de falha em um dado intervalo de tempo entre  $t_1$  e  $t_2$  pode ser expressa pela função confiabilidade:

$$\int_{t_1}^{\infty} f(t)dt - \int_{t_2}^{\infty} f(t)dt = R(t_1) - R(t_2) \quad (3)$$

A taxa na qual as falhas ocorrem no intervalo de tempo  $t_1$  a  $t_2$  é chamada de taxa de falha, e é representada pela função  $\lambda(t)$ . Essa taxa de falha é definida como a razão da probabilidade de ocorrência de falha no intervalo, dividido pelo comprimento do intervalo, considerando que nenhuma falha tenha ocorrido antes do início do intervalo (antes de  $t_1$ ). Ou seja:

$$\lambda(t) = \frac{R(t_1) - R(t_2)}{(t_2 - t_1)R(t_1)} \quad (4)$$

Extrapolando para um conceito geral, a taxa de falha pode ser expressa pela equação:

$$\lambda(t) = \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{\Delta t R(t)} \quad (5)$$

Onde  $t = t_1$  e  $t_2 = t + \Delta t$ .

A taxa de risco,  $h(t)$ , ou taxa de falha instantânea é definida como o limite da taxa de falha nas aproximações do intervalo zero, ou seja:

$$\begin{aligned} h(t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left[ \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{\Delta t R(t)} \right] \\ &= \frac{-1}{R(t)} \left[ \frac{dR(t)}{dt} \right] = \frac{1}{R(t)} \left[ \frac{-dR(t)}{dt} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

Donde se deduz diferenciando a equação 2:

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (7)$$

Esta é uma das relações fundamentais na análise de confiabilidade. Se for conhecida a função densidade de probabilidade até a falha  $f(t)$  e a função confiabilidade  $R(t)$ , a função taxa de risco para qualquer tempo  $t$  pode ser encontrada. A relação é fundamental e importante, pois independe da distribuição estatística. A equação geral que expressa a função confiabilidade é dada por:

$$R(t) = e^{-\int_0^t h(t) dt} \quad (8)$$

Se a taxa de risco  $h(t)$ , for considerada uma taxa de falha constante, ou seja,  $h(t) = \lambda$ , o que é verdadeiro para a maioria dos casos de componentes eletrônicos durante a sua vida útil, a equação geral torna-se a equação 1, apresentada anteriormente:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

Portanto, o domínio eletrônico do produto mecatrônico é regido em sua maioria por uma taxa de falha constante e o cálculo da confiabilidade é simplificado.

No domínio mecânico, existem alguns fatores que são utilizados na medida da confiabilidade:

- a) Tempo Médio até a Falha - MTTF (*Mean Time To Failure*);

- b) Vida Média  $\theta$  (*Mean Life*);
- c) Tempo Médio entre Falhas - MTBF (*Mean Time Between Failure*).

O Tempo Médio até a Falha (MTTF) é a expectativa de tempo para ocorrer uma falha e é obtido da teoria da estatística por:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad (9)$$

Para equipamentos mecânicos reparáveis, o MTTF é definido como o tempo médio para a primeira falha. A vida média  $\theta$  refere-se à população total de itens existentes. Por exemplo, dada uma população inicial de  $n$  itens, se todos eles estão operando até a falha, a vida média é a média aritmética do tempo que cada um levou até a falha, ou seja:

$$\theta(t) = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} \quad (10)$$

Onde  $t_i$  é o tempo para a falha de todos os itens da população e  $n$  é o número total de itens da população. O Tempo Médio entre Falhas (MTBF) é um conceito que aparece na literatura de confiabilidade aplicado a itens reparáveis, no qual os elementos falhados são substituídos. A equação que expressa o MTBF é:

$$MTBF = \frac{T(t)}{r} \quad (12)$$

Onde  $T(t)$  é o tempo total de operação e  $r$  é o número de falhas ocorridas nesse tempo. Como o MTBF só tem significado para itens reparáveis, ele representa o mesmo parâmetro da vida média  $\theta$ . Outro fato é que a taxa de risco é constante. Considerando essas duas suposições, a função confiabilidade pode ser representada pela fórmula:

$$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-t/\theta} = e^{-t/MTBF} \quad (13)$$

E, nesse caso, a taxa de falha é igual ao inverso do MTBF:

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (14)$$

Existem várias distribuições estatísticas que podem ser utilizadas para modelar os parâmetros de confiabilidade. Elas podem ser contínuas ou discretas:

Distribuições Contínuas mais usuais:

- a) Distribuição Normal
- b) Distribuição Lognormal
- c) Distribuição Exponencial
- d) Distribuição Gama
- e) Distribuição de Weibull

Distribuições Discretas:

- a) Distribuição Binomial
- b) Distribuição de Poisson

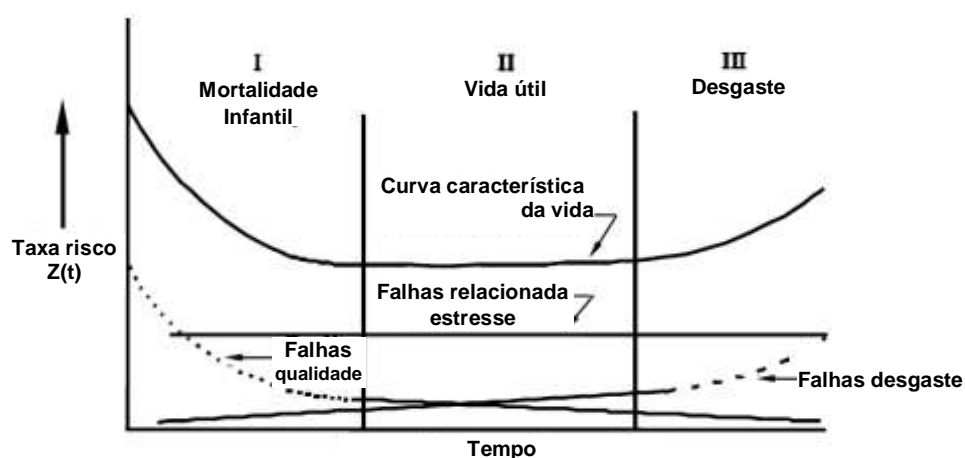
A distribuição normal é, em geral, aplicada na análise de itens que exibem falhas devido aos desgastes, como normalmente acontece no domínio mecânico. A distribuição normal é um caso particular da distribuição de Weibull, que é a distribuição geral aplicada no domínio mecânico.

### **1.2.2 Modelagem de Falhas**

A modelagem de falhas é importante para o desenvolvimento das técnicas de predição. As entradas para os modelos de taxa de falha são os dados operacionais de campo, dados de teste, julgamento de engenharia e informações físicas da falha. Estas entradas são usadas pelo engenheiro de confiabilidade para construir e validar os modelos estatísticos de taxa de falhas, normalmente utilizando uma das formas de distribuição estatística descritas anteriormente e estimando os parâmetros de confiabilidade.

Uma curva padrão de tempo *versus* taxa de falhas em equipamentos pode ser observada na figura 3. Uma característica padrão é o período decrescente da taxa de falha (DFR- *Decreasing Failure Rate*), área I da figura, seguido de um período em que a taxa de falha é constante (CFR - *Constant Failure Rate*), área II, e um período final em que a taxa de falha é crescente (IFR - *Increasing Failure Rate*), área III.

Figura 3 – Taxa de risco como uma função da idade



Fonte: (DHILLON, 1999)

O período DFR é caracterizado pela mortalidade infantil, que normalmente é resultado de um projeto deficiente, pelo uso de componentes abaixo do padrão mínimo de qualidade, ou pela falta de controle adequado no processo de fabricação e montagem. Quando esses erros não são detectados pelas inspeções de controle de qualidade, o resultado provável são falhas logo no início operacional do produto. É justamente na elaboração de um projeto conceitual adequado que os erros na fase DFR podem ser minimizados. Para isso, é importante abordar os aspectos de confiabilidade, ou seja, detecção de falhas funcionais em potencial nessa fase de projeto para se conseguir um bom desempenho do produto no início de operação com um custo reduzido.

O período CFR corresponde à vida útil do equipamento e é a base para aplicação dos principais métodos de projeto de engenharia de confiabilidade, uma

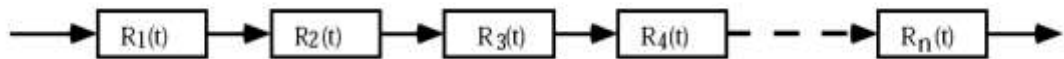


vez que a taxa de risco é constante, e a distribuição exponencial de tempo para a falha é aplicável no processo de projeto e predição.

O período IFR é o resultado da deterioração do equipamento devido à idade ou uso. Os componentes mecânicos desgastam e falham. As falhas podem ser postergadas e a vida útil do equipamento estendida, quando se tem um bom projeto e boas práticas de manutenção. O caminho para a prevenção da falha devido ao desgaste é somente substituindo ou reparando o componente deteriorado antes que ocorra a falha.

Para a modelagem de falhas, os componentes do produto ou sistema podem estar ligados em série ou em paralelo. Na configuração em série, o êxito da operação do sistema depende do funcionamento apropriado de todos os componentes. Uma falha de um componente representa a falha total do sistema. A configuração em série pode ser representada por um diagrama de blocos, como ilustra a Figura 4, com n componentes.

Figura 4 – Diagrama de blocos da configuração em série



Fonte: (DHILLON, 1999)

A confiabilidade do produto ou sistema na configuração em série é o produto da confiabilidade dos componentes individuais envolvidos, ou seja:

$$R_S(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot R_3(t) \cdot \dots \cdot R_n(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (15)$$

Considere um sistema composto de quarenta componentes, cada um tendo uma distribuição exponencial para a função densidade de falha. A confiabilidade de cada componente no tempo t é igual a 0,99. Se esses componentes estão ligados em série então a confiabilidade do sistema no tempo t é igual a:

$$R_S(t) = 0,99^{40} = 0,67 = 67\%$$

Significa que, em um produto ou sistema com mil componentes, são esperados que seiscentos e setenta componentes falhem no tempo t. A

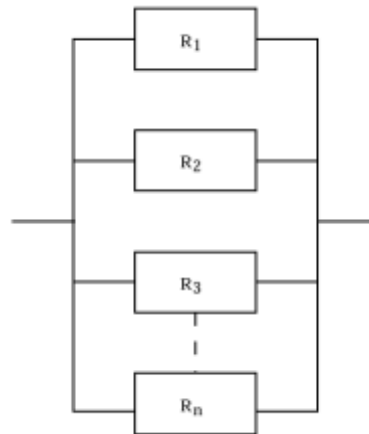
confiabilidade do sistema na configuração em série é sempre menor do que a menor confiabilidade de quaisquer componentes.

Na configuração em paralelo, é necessário que todos os componentes ligados falhem para que o produto ou sistema venha a falhar. A configuração em paralelo pode ser representada por um diagrama de blocos como ilustra a Figura 5, com n componentes.

Seja  $Q_i = (1 - R_i) = 1 - e^{-\lambda t}$ , a probabilidade de falha, ou não confiabilidade, de cada componente. Então, a não confiabilidade do sistema é dada por:

$$Q_s = Q_1 \cdot Q_2 \cdot \dots \cdot Q_n = \prod_{i=1}^n Q_i \quad (16)$$

Figura 5 – Diagrama de blocos da configuração em paralelo



Fonte: (DHILLON, 1999)

E a confiabilidade do sistema é obtida pela fórmula a seguir, uma vez que o somatório da confiabilidade e não confiabilidade é igual a um, ou seja, ( $R_s + Q_s = 1$ ).

$$R_s = 1 - Q_s \quad (17)$$

Considere o sistema anterior composto de quarenta componentes ligados agora em paralelo, cada um com a confiabilidade de 0.99. Então:

$$Q_i = 1 - R_i = 1 - 0,99 = 0,01$$

$$Q_s = (0,01)^{40} = 10^{-80} = 0000000000000000000000000000000001$$

$$R_s = 1 - Q_s = 0,99999999999999999999999999999999$$

A confiabilidade do produto ou sistema na configuração em paralelo é sempre maior do que a dos componentes e é, por isso, que a configuração em paralelo, ou

o uso da redundância, é um dos procedimentos mais utilizados no projeto para alcançar uma elevada confiabilidade do produto ou sistema. Trata-se de um conceito simples, mas que se mostra complexo na prática real. A adição de sistemas redundantes implica em mais componentes sujeitos a falhas, sobretudo, se os componentes redundantes possuem as mesmas características do componente principal. Além disso, existe a necessidade de verificações periódicas nas condições operacionais dos componentes redundantes em estado de espera para garantir a sua integridade quando solicitado.

O componente redundante pode ser ativo ou em estado de espera (*standby*). O componente redundante ativo costuma ser mantido em funcionamento para atender ao sistema, no caso de falha do componente principal. Ele está submetido às mesmas condições operacionais do componente principal e seu desgaste gradual reduz a sua confiabilidade da mesma forma que ocorre com o componente principal, ou seja, aumenta a probabilidade de ambos virem a falhar ao mesmo tempo.

O componente redundante em estado de espera (*standby*) se mantém fora de operação, parado, e, quando solicitado, é necessário a intervenção do homem ou sistema automatizado para ativá-lo e colocá-lo em operação substituindo o componente principal. Como não está operando, não existe desgaste e a sua confiabilidade é mantida. Entretanto, é necessário garantir que o componente redundante esteja operável quando solicitado. Testes periódicos de funcionamento, portanto, devem ser realizados.

Como dito anteriormente, a modelagem de falhas é importante para o desenvolvimento das técnicas de predição e, o conhecimento dos modos de falhas, ou seja, a forma ou a maneira pela qual o defeito se apresenta, possibilita identificar como um componente, subsistema ou sistema potencialmente falharia ao cumprir o objetivo do projeto. O capítulo seguinte aborda os principais modos de falhas encontrados nos domínios da mecatrônica fornecendo o conhecimento necessário para a melhoria da confiabilidade na fase de projeto conceitual.

## 2 MODOS DE FALHAS NO DOMÍNIO DA MECATRÔNICA

A aplicação da teoria da confiabilidade, baseada em modelos estatísticos para o cálculo da probabilidade, requer uma definição física do produto. No projeto conceitual, o que se tem são modelos funcionais e a ideia de como o produto irá funcionar, não sendo assim fácil aplicar tais modelos estatísticos.

A confiabilidade no projeto conceitual não está diretamente preocupada com a probabilidade da falha, mas em gerar um produto mais efetivo em relação à melhoria da confiabilidade a um custo reduzido. Parte-se do princípio de que é possível avaliar os conceitos selecionados quanto às suas falhas funcionais em potencial, as quais podem se manifestar ao longo do seu ciclo de vida.

Detectar essas falhas funcionais em potencial na fase de projeto conceitual é muito importante porque modificações do conceito podem ainda ser realizadas a um custo reduzido, evitando modificações de projeto nas fases seguintes, que acabam implicando em perda de tempo dos projetistas no detalhamento de um conceito não confiável. Também, na fase de fabricação, a identificação de falhas pode ser efetuada. Nesse estágio, porém, os compromissos de material e mão de obra são maiores, resultando em elevados custos (SANTANA, LEPIKSON, 2008).

Um produto é composto de Sistemas, Subsistemas e Componentes (SSCs) e o conhecimento dos principais modos de falhas de cada componente auxilia na identificação dos possíveis modos de falhas funcionais em potencial a que o produto está passível.

O desenvolvimento de um produto mecatrônico, especificamente, envolve o conhecimento das particularidades no domínio mecânico, eletrônico, software e controle. Para facilitar a compreensão e entendimento serão descritos a seguir os principais modos de falhas encontrados nos domínios que interagem com o produto mecatrônico. É importante observar que, no produto mecatrônico, modos de falhas em um domínio podem desencadear problemas em outro domínio. Por exemplo, um modo de falha no hardware pode propagar erros no software. No método CPCPM proposto, a integração dos modos de falhas de cada domínio é conseguida na multiplicação das matrizes.

## 2.1 MODOS DE FALHAS NO DOMÍNIO MECÂNICO

De acordo com Dhillon (1999), os componentes mecânicos estão sujeitos a desgastes devido a atritos, corrosão, erosão e vibração, entre outros. Entre as falhas nos equipamentos mecânicos, as principais são:

- a) **Falha metalúrgica** – Modos de falhas ocasionados por falha no material devido à oxidação extrema ou operação em ambiente corrosivo. As condições ambientais, tais como calor, erosão e corrosão aceleram a ocorrência das falhas metalúrgica;
- b) **Falha de resistência ao limite de escoamento** – Modos de falhas devido à tensão aplicada, exceder o limite de resistência ao escoamento do material. Normalmente, a consequência é a deformação permanente do material na estrutura e é raramente catastrófica;
- c) **Falha por flambagem** – Modos de falhas que ocorrem nos elementos estruturais, tais como, colunas e vigas, particularmente em componentes fabricados de material fino, em que a carga é normalmente de compressão. A falha por flambagem pode também resultar do esforço de torção ou carregamento combinado. Este tipo de modo de falha enfraquece ou conduz a uma falha total da estrutura;
- d) **Falha por fadiga** – Modos de falhas que ocorrem por causa de esforços cíclicos em um componente. Para prevenir a ocorrência deste tipo de falha, é necessário selecionar materiais resistentes a cargas cíclicas. O aço e o alumínio têm boa resistência às cargas cíclicas;
- e) **Falha de mancal** – Modos de falhas que ocorrem devido a folgas inadequadas ou falta de lubrificação. Folgas excessivas causam vibração e folgas apertadas causam grandes esforços, devido o atrito elevado. O mesmo acontece se a lubrificação for deficiente;
- f) **Falha corrosiva** – Modos de falhas que ocorrem devido às agressividades do meio em que está inserido o componente. Para prevenir, são selecionados materiais resistentes à corrosão;

- g) **Falha erosiva** – Modos de falhas que ocorrem devido às partículas sólidas em suspensão no meio em que está inserido o componente. Para evitar o desgaste, deve-se, preventivamente, selecionar materiais com dureza elevada. Quando o meio é agressivo do ponto de vista corrosivo, o processo de falha é acelerado pela combinação corrosão *versus* erosão;
- h) **Falha devido à vibração** – Modos de falhas que ocorrem devido ao mal funcionamento das partes móveis, devido a irregularidades da superfície de deslocamento ou folgas excessivas. No caso de movimento rotativo, pode ser ocasionado pelo desbalanceamento da massa girante. Esse tipo de falha tem impacto significativo em componentes eletrônicos inseridos no componente mecânico. Para prevenir, devem ser corrigidas as irregularidades ou utilizados sistemas de amortecimento;
- i) **Falha por concentração de tensão** – Modos de falhas que ocorrem em situações de fluxo de tensão irregular através do projeto mecânico. Normalmente a concentração de tensão ocorre em transições bruscas de espessuras ou em juntas de angulo reto;
- j) **Falha por cisalhamento** – Modos de falhas que ocorrem quando a tensão de cisalhamento é maior que a resistência do material devido à aplicação de uma força de torção excessiva. Normalmente, a falha ocorre em um angulo de 45° em relação ao eixo principal;
- k) **Falha por fluência** – Modos de falhas que ocorrem pela deformação (esticamento) dos materiais elásticos, quando submetidos a uma carga contínua em longo prazo, mesmo que a tensão aplicada seja menor do que o limite de escoamento. Em elevadas temperaturas a deformação do material é acelerada;
- l) **Falha devido à temperatura** – Modos de falhas que ocorre devido o calor gerado pelo meio em que está inserido o componente, como pelo próprio componente. Junto com a vibração, esse tipo de falha tem impacto significativo em componentes eletrônicos inseridos no componente mecânico. Para prevenir, um sistema de dissipação de calor é inserido.

Para garantir a integridade dos componentes mecânicos, são utilizados fatores de segurança, que basicamente são multiplicadores arbitrários, para garantir os esforços dentro dos limites de resistência dos materiais. Esses índices fornecem um projeto satisfatório se forem estabelecidos com cuidado. Fatores de segurança equivocados podem ocasionar custos desnecessários, devido o excesso de segurança ou catastrófico se for subestimado. O fator de segurança determina quantas vezes a máxima tensão de trabalho admissível deve ficar abaixo do limite de tensão de resistência do material.

$$\text{Fator Segurança (FS)} = \frac{\text{Resistência do material (RM)}}{\text{Máxima tensão de trabalho admissível (MTTA)}}$$

## 2.2 MODOS DE FALHAS NO DOMÍNIO ELETRÔNICO

Os componentes eletrônicos, contrariamente ao que ocorre com os de natureza mecânica, não costumam se degradar, apesar de eletromigração ser considerado um mecanismo de degradação, cuja ocorrência se dá nos circuitos integrados. Efeitos decorrentes do envelhecimento dos materiais também são possíveis de ocorrer. Estes se tornam aspectos de extrema preocupação, principalmente, quando combinados com efeitos ambientais, tais como vibrações, corrosão e temperatura (CARCHIA, 1999).

O circuito integrado (CI) é uma coleção de dispositivos eletrônicos, tais como transistores, diodos e resistores, que são fabricados e interconectados, de forma eletrônica, num pequeno pacote, o chip, de material semicondutor. O circuito integrado é composto de um circuito ativo, o chip, no centro do encapsulamento do pacote, com fios de ligação do chip para os pinos de entrada e saída (ONWUBOLU, 2005).

Filmes de isolamento e condução são amplamente utilizados na fabricação dos circuitos integrados, servindo como máscara, por difusão ou implante, e como proteção da superfície do semicondutor. Materiais do filme, como informa Onwubolu (2005), incluem o poli-silício, nitreto de silício, dióxido de silício, tungstênio, titânio e

alumínio. Uma série de técnicas é usada para depositar o filme, incluindo a evaporação, respingos e deposição química a vapor.

O dióxido de silício é um isolante e, uma vez que as superfícies de silício têm uma afinidade extremamente alta com o oxigênio, ele pode ser facilmente produzido na superfície de uma pastilha de silício.

Muitos são os mecanismos e modos de falhas que normalmente acontecem nos circuitos integrados, memórias, unidades de processamento central e nos *links* de comunicação. A seguir, são descritos os principais deles, ressaltando os impactos dos fatores ambientais já mencionados. Assim será possível compreender a importância de se levar em consideração esses fatores já na concepção do produto mecatrônico:

**a) Circuitos Integrados** - Os circuitos integrados podem exibir os modos de falhas listados no quadro 1, sendo que a perda de bit de dados é característica dos dispositivos de memória (KORSAH, MUHLHEIM, HOLCOMB, 2007). Existem três situações em que o circuito integrado pode falhar,

Quadro 1 – Modos e mecanismos de falhas do circuito integrado

Componente Digital	Mecanismo de falha	Modos de falha
CPU (microprocessador) circuitos integrado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Falha da ligação do filme</li> <li>• Falha de metalização</li> <li>• Contaminação</li> <li>• Trinca e rachadura</li> <li>• Defeitos do óxido</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta corrente de fuga</li> <li>• Saída retida nível baixo</li> <li>• Curtocircuitado</li> </ul>
Memória (circuito Integrado MOS)	Falha mecânica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perda bits de dados</li> <li>• Curto-circuito</li> <li>• Circuito aberto</li> <li>• Transferência lenta de dados</li> </ul>
Circuito Integrado digital (geral)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contaminação</li> <li>• Defeitos do óxido</li> <li>• Falha de ligação do fio</li> <li>• Falha de metalização</li> <li>• Falha de ligação do filme</li> <li>• Falha relacionada ao pacote</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Circuito aberto</li> <li>• Curto-circuito</li> <li>• Saída retida nível alto</li> <li>• Saída retida nível baixo</li> <li>• Suprimento aberto</li> </ul>

Fonte:(KORSAH, MUHLHEIM, HOLCOMB, 2007)



- Os dados de entrada para o IC podem ser alterados entre os pinos e o chip, devido a contatos inadvertidos entre fios, podendo provocar curto-circuito ou impedir um bit correto ser lido;
- Os dados de saída do IC podem ser alterados entre os pinos e o chip, devido a um curto-circuito no pino de saída, e falhar na transferência de dados;
- O chip pode falhar na execução de suas funções especificadas de I/O. O chip consiste de milhões de transistores em uma parte integral do material de silício. Um ou mais transistores podem percorrer caminhos diferentes do circuito e, como resultado, podem apresentar um ou mais mecanismos de falha, citados no quadro 1.

**b) Memória e Unidades de Processamento Central** – Para os sistemas de memória, do ponto de vista do projeto crítico de segurança, deve ser considerado o modo de falha mais crítico. Por exemplo, quando um endereço de entrada de memória falha ao retornar um dado estocado, requerido ou instrução. Falhas para armazenar dados corretamente podem não ter um efeito imediato, porém, são capazes de se manifestar sempre que um dado incorreto for lido.

A situação torna-se mais complexa se a falha de memória resulta em uma leitura de uma instrução incorreta pela CPU. Como resultado, a CPU pode executar um programa aleatório, com dados inicialmente interpretados como instrução e vice versa. Provavelmente, o resultado é a CPU executar um *loop* ou chegar a um impasse. Se o processador está envolvido em uma função de segurança, o resultado pode ser desastroso, a menos que esse modo de falha seja detectado (KORSAH, MUHLHEIM, HOLCOMB, 2007).

Modos de falha funcional na CPU são semelhantes à falha de memória. A CPU pode liberar um dado incorreto ou travar o programa, podendo resultar em uma situação insegura. O quadro 2 ilustra o efeito da falha de diferentes componentes da CPU.

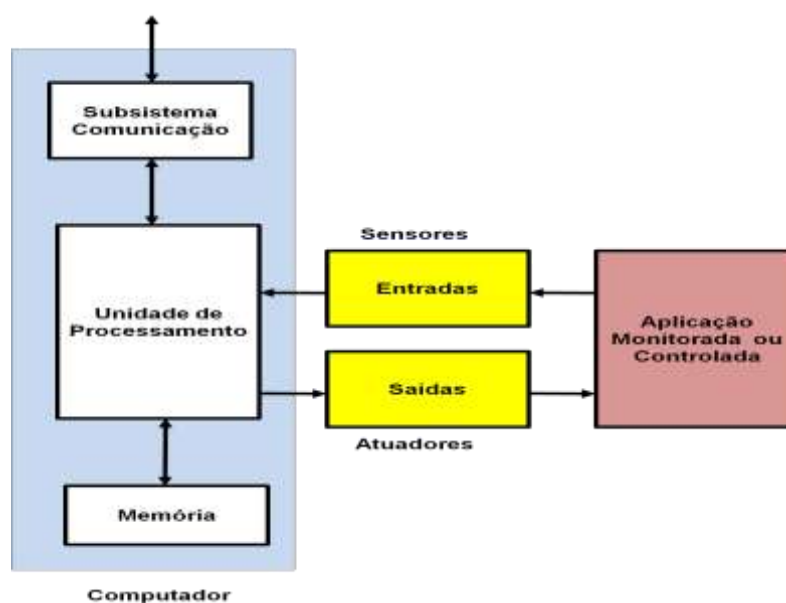
Quadro 2 – Modos de falhas funcional na CPU

Componentes da Unidade central de processamento falhada	Efeito local da falha
Unidade lógica aritmética (ALU)	Aritmética ou lógica produz resultados de operação incorreto
Descodificador de instruções e ponteiro	Gera endereço incorreto causando a memória retornar conteúdos incorreto
Acumulador e registrador	Alteração potencial de endereço ou dados corretos
Porta de entrada	Altera dados de entrada correto
Porta de saída	Altera dados de saída correto
Interface dados de memória	Altera a escrita de dados para memória ou lê instruções e dados da memória
Interface endereço memória	Altera o endereço correto antes de endereçamento da memória

Fonte: (KORSAH, MUHLHEIM, HOLCOMB, 2007)

**c) Link de comunicação de dados** - O computador pode se comunicar com o mundo externo através de *link* de comunicação de dados, conforme ilustra a figura 6.

Figura 6 - Comunicação no sistema de computador



Fonte: (KORSAH, MUHLHEIM, HOLCOMB, 2007)

No produto mecatrônico, essa comunicação acontece também entre a troca de informações oriundas dos sensores e os sinais de controle enviado para os atuadores. Os principais erros de comunicação são:

- Corrupção de Dados - a mensagem pode estar corrompida devido a erros no barramento, nos meios de transmissão ou interferência na mensagem;
- Repetição involuntária - devido a um defeito, falha, interferência ou desatualização, a mensagem se repete em um ponto incorreto no tempo;
- Sequência Incorreta - devido a um erro, falha ou interferência, a sequência pré-definida (por exemplo, números naturais, referência de tempo), associada com as mensagens de uma determinada fonte está incorreta;
- Perda de Dados - devido a um erro, falha ou interferência, uma mensagem não é recebida ou não reconhecida;
- Atraso inaceitável – a mensagem pode estar atrasada além de seu limite permitido de hora de chegada. Isso pode estar associado a erros no meio de transmissão, linhas de transmissão congestionadas, interferência ou ao barramento enviar mensagem de tal forma que os serviços estão atrasados ou negados;
- Inserção - devido a uma falha ou interferência, uma mensagem é inserida e se relaciona com uma entidade fonte inesperada ou desconhecida;
- Simulação - devido a uma falha ou interferência, provavelmente intencional, uma mensagem é inserida e se relaciona com uma entidade fonte aparentemente válida, e então uma mensagem não segura pode ser recebida por um participante seguro, que depois a trata como se fosse segura;
- Endereçamento - devido a uma falha ou interferência, uma mensagem segura pode ser enviada errada para um participante seguro, que em seguida trata a recepção como correta

**d) Descarga Eletroestática** – Componentes eletrônicos são propensos a danos causados por densidade de correntes elevadas devido à sua natureza

delicada e incapacidade de dissipar calor. Dessa forma, tensões transientes como as causadas por descarga eletrostática, raios e transientes de alimentação de comutação ou iluminação podem causar falhas no sistema (DoD, 1998).

- e) Temperatura** - Os parâmetros dos componentes eletrônicos variam com a temperatura, e é importante não exceder a faixa recomendada pelos fabricantes. Componentes geram calor em operação, e quando combinado com a temperatura ambiente e radiação solar, temperaturas excessivas podem ser atingidas. Além disso, como no projeto de sistemas eletrônicos é dada maior ênfase no estabelecimento de dimensões reduzidas e altas densidades das partes, isso tende a aumentar consideravelmente a temperatura. Nesse caso é necessário um sistema de resfriamento para dissipar o calor gerado pelos elementos de produção de calor.

É importante frisar que o aquecimento não é somente provocado pela temperatura ambiente, mas também pela radiação térmica das partes vizinhas. Portanto, técnicas de melhoramento da confiabilidade para tensões a alta temperatura incluem o uso de dispositivos de dissipação de calor, sistemas de resfriamento, isolamento térmico e materiais resistentes à temperatura (DoD, 1998).

- f) Choque Ambiental e Vibração** - O equipamento eletrônico está frequentemente submetido a choque ambiental e vibração, ambos, durante a operação normal e teste. A vibração pode ser particularmente severa para os conectores elétricos, uma vez que ela pode causar movimento relativo entre os membros da conexão. Este movimento, em combinação com outros agressores ambientais, pode produzir corrosão por fricção (*fretting corrosion*), gerando fragmentos de desgaste e causando grandes variações na resistência de contato. Técnicas de melhoramento de confiabilidade para tensões de vibração incluem o uso de reforço (enrijecimento), controle de ressonância e redução do movimento livre (DoD, 1998).
- g) Umidade e Atmosfera Salobra** - degradam o desempenho do equipamento eletrônico visto que promovem efeitos de corrosão nos componentes metálicos. Isso pode estimular a criação de células galvânicas,

particularmente quando materiais dissimilares estão em contato. Outro efeito dielétrico da umidade e atmosfera salobra é a formação de filmes na superfície das partes não metálicas. Estes filmes causam fuga de corrente elétrica e degradação do isolamento e das propriedades dielétricas desses materiais. Técnicas de melhoramento da confiabilidade para umidade e atmosfera salobra incluem o uso de vedação hermética, materiais resistentes à umidade, desumidificador, revestimento protetor, cobertura protetora, e redução no uso de materiais dissimilares (DoD, 1998).

- h) Radiação eletromagnética** - frequentemente produz interferência e efeitos de ruído dentro do circuito eletrônico, que podem prejudicar o desempenho funcional do sistema. Fontes destes efeitos incluem motores elétricos, amplificadores, radiação de radares, transformadores, etc. Nos sistemas digitais, um condutor - agindo como uma antena - pode captar os sinais eletromagnéticos e corromper os dados digitais. Geralmente, a redução dos efeitos de interferência requer a incorporação de filtragem e característica de blindagem, ou ainda a especificação de componentes menos susceptíveis (DoD, 1998).
- i) Radiação Nuclear** - pode causar dano permanente pela alteração dos átomos ou estrutura molecular do dielétrico dos materiais semicondutores. A radiação de alta energia pode causar efeitos de ionização, o qual degrada os níveis de isolamento dos materiais dielétricos. A mitigação dos efeitos da radiação nuclear envolve o uso de materiais e partes de processamento de alto grau de resistência a radiação, bem como a incorporação de blindagem (DoD, 1998).

### 2.3 MODOS DE FALHAS NO DOMÍNIO DO SOFTWARE

O software consiste de instruções e dados residente no hardware. As instruções funcionam corretamente enquanto o hardware estiver funcionando corretamente. Um software simples pode ser escrito livre de erros. A propensão a erros aumenta com o tamanho e complexidade do software, e os embarcados em sistemas mecatrônicos não fogem à regra. Exemplos disso inclui o software em

sistemas automotivos, o forno de microondas, o Gravador de Vídeo Cassete (VCR) e o Disco de Vídeo Digital (*DVD player*). O problema aparece quando os requisitos se tornam complexos (KORSAH, MUHLHEIM, HOLCOMB, 2007). Em geral, as falhas de software podem ser provenientes das seguintes fontes:

- a) O software aplicativo gerado pelo projetista que controla o desempenho das tarefas práticas;
- b) O software de sistema, usado para hospedar o software aplicativo em tempo real e fornecer uma interface entre ele e o software aplicativo;
- c) O software de desenvolvimento, usado para compilar o código fonte do software aplicativo em código de execução.

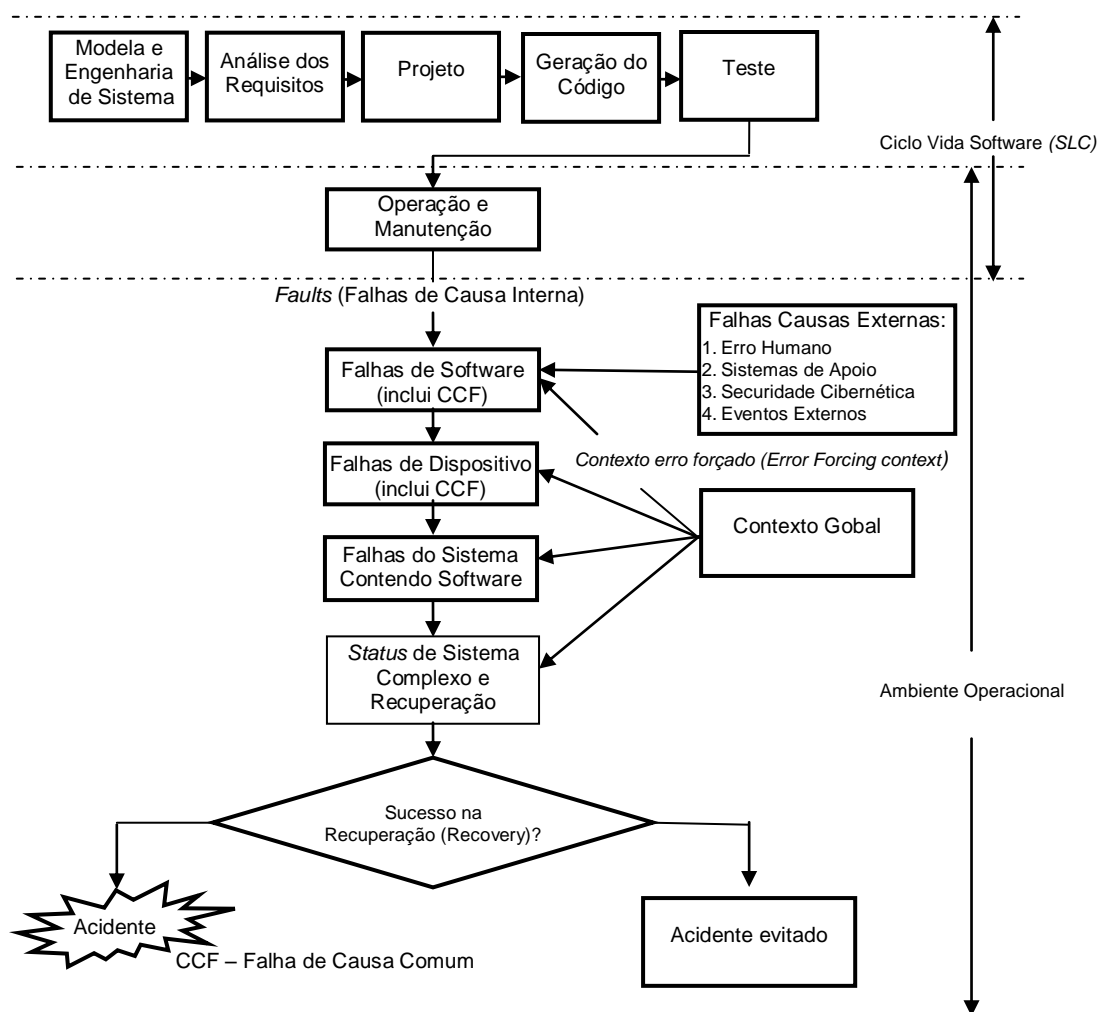
Os modos de falhas em software são originados do ciclo de vida do software (*Software Life Cycle – SLC*) e do ambiente operacional em que ele está inserido. A figura 7 ilustra o modelo de falhas que costumam afetar o software –conceitos envolvidos são explicados adiante.

O software é desenvolvido em vários estágios que transformam seus conceitos em um código, cuja execução se por meio de um processador de um computador ou microcontrolador. Um erro (*fault*) pode ser introduzido em qualquer estágio do desenvolvimento e permanecer inativo ou latente no sistema, até que um conjunto específico de condições desencadeie a propagação do erro a ponto de torná-lo evidente e mantê-lo em atividade (CHU et al, 2006).

Uma razão para que os modos de falhas em software sejam mais complexos que os modos de falhas em hardware é que eles são dependentes do momento (tempo) em que ele acontece. Especialmente para software embarcado, o erro de um sinal de entrada ou saída, devido à sequência no tempo o conduz a uma desordem. O desenvolvimento de software é realizado em seis estágios:

- a) Modelagem e engenharia do sistema;
- b) Análise dos requisitos;
- c) Projeto e análise do software;
- d) Geração do código;
- e) Testes e operação e manutenção.

Figura 7 – Modelo de falhas de software



Fonte: (CHU et al, 2006)

O software interage com o ambiente em quatro níveis: o software propriamente dito, o dispositivo por ele controlado, o sistema onde o software e o dispositivo estão embarcados e a planta, que é o sistema complexo como um todo. Esta, aliás, fornece um contexto global para a operação do software, os dispositivos e os sistemas. A entrada do software depende do estado da planta e, assim, falhas latentes (*fault*) são disparadas pelas entradas do software, ou seja, pelo contexto da planta. O contexto que causa a falha do software é chamado de contexto erro forçado (*error forcing context*) (CHU et al, 2006). Nele estão incluídas as falhas de causa comum – *Common Cause Failure* (CCF). Um CCF pode ser descrito como qualquer ocorrência em que vários itens falham devido a uma única causa. Assim, a

ocorrência de falhas de causa comum pode levar à redução da confiabilidade do sistema

A falha de software é propagada diretamente para o dispositivo controlado pelo software, que pode resultar em degradação ou falha do sistema associado.

Os modos de falhas em software podem ser analisados no nível do próprio software ou no nível de suas funções genéricas, como entrada/saída.

De acordo com o processo dinâmico de execução do software, o funcionamento defeituoso inclui:

- a) **Software Trava** – Nesse modo de falha, o software executa um loop infinito e deixa de gerar saídas, criando um impasse entre processos;
- b) **Software Executa com Saídas Erradas** – Nesse modo de falha o software continua executando, mas, gera saídas incorretas, decorrentes de entradas incorretas;
- c) **Projeto Interface Homem Máquina Deficiente** – Esse modo de falha inclui comandos equivocados do usuário, exibição de informações incompletas ou incorretas na tela da interface, devido a problemas no software, a exemplo de alarmes perdidos e saídas não conservadas.

O software utiliza dados de entrada do hardware. O dado de entrada é processado e o dado de saída é enviado para fora. Durante a execução do software, recursos são requeridos, como a memória e a CPU, e pode ocorrer comunicação entre os diversos processos do software.

Os modos de falhas no nível dos elementos de software podem ser divididos em cinco componentes que executam funções genéricas:

- a) Entrada (*Input*);
- b) Saída (*Output*);
- c) Comunicação;
- d) Alocação de recursos;
- e) Processamento.



Os modos de falhas genéricos descritos a seguir são aplicáveis para todos os cinco componentes de software:

- a) Falha de tempo ou ordem;
- b) Falha de interrupção induzida;
- c) Omissão de uma função ou atributo requerido;
- d) Função ou atributo involutário além das funções e atributos pretendidos;
- e) Implementação incorreta de uma função ou atributo;
- f) Erro de dado que não foi identificado e não é rejeitado pela lógica do software.

As causas de falhas internas de software acontecem em todos os estágios de seu desenvolvimento, conforme ilustra o ciclo de vida do software (*Software Life Cycle* - SLC) presente na figura 7.

- a) **Modelagem e Engenharia de Software** – O software desenvolvido não pode ser integrado no sistema global. Pode ocorrer incompatibilidade entre o software e o sistema global ocasionada por padrões desatualizados ou outros fatores.
- b) **Análise e Requisito do Software** – Os requisitos definidos para o software estão incompletos ou incorretos. Certas funções que o software deveria executar não foram especificadas, ou uma condição que pode impactar em uma função específica não foi levada em consideração.
- c) **Projeto e Análise do Software** – Não inclusão de funções desejadas do software e adoção de algoritmos impróprios. Para sistemas em tempo real a falta de interação do sincronismo entre os dados e o processo é crítico. O mesmo pode ser dito para aqueles sistemas afetados pela falha de comunicação entre os multiprocessos. De um modo geral as causas de falhas são cálculos, algoritmos, lógica, manipulação de dados, tolerância à falha, interface e falha temporal.
- d) **Geração do Código** – Na geração do código podem ser introduzidos erros no software porque este não foi codificado como pretendido. Embora projetado, o código está passível de variáveis com erros

ortográficos, uso incorreto, referência errada de dados e funções não codificadas.

- e) **Testes** – Os testes insuficientes ou inadequados podem causar falhas desconhecidas, ou seja, o plano de teste ou procedimento de teste incompleto. O teste de regressão não foi executado no software modificado, e o software não foi testado para diferentes ambientes de execução. Também não ocorre validação antes do lançamento ou das mudanças no software.
- f) **Operação e Manutenção** – As falhas são causadas pelas modificações no software. Estas derivam de atualizações indevidas, da incompatibilidade entre a atualização do software e o hardware existente e do plano de configuração do software (plano de manutenção). Também são influentes os problemas de suporte do produto após instalação e atualizações e o problema de gerenciamento da configuração do software.

As causas de falhas externas são consideradas como falha de software porque representam a dependência do software em seu ambiente operacional.

- a) **Erros Humanos** – Uma pessoa pode usar o software em um ambiente operacional para o qual ele não foi projetado ou pode inadvertidamente entrar com dados incorretos no software.
- b) **Sistemas de Apoio** – Um software, que é usado para realizar funções em um sistema complexo, como o controle de determinado dispositivo, requer sistemas de apoio, tais como disco rígido, energia elétrica, e sistemas de aquecimento, ventilação ou ar condicionado. A falha desses sistemas afeta o desempenho do hardware e conseqüentemente do software.
- c) **Segurança Cibernética** – O funcionamento do software pode ser comprometido pelas ameaças cibernéticas, como vírus e pirataria. O software pode ser mais vulnerável se estiver incorporado em um computador conectado a uma rede.
- d) **Ambiente** – Mudanças ambientais que afetam o hardware, já comentadas, podem gerar efeitos imprevisíveis no software.

Segundo Huang, Zhang e Lu (2009), os modos de falhas em software podem ser classificados em três categorias, as quais respeitam a localização em que as falhas se originam:

- a) Falhas no processo de entrada;
- b) Falhas no gerenciamento de processo;
- c) Falhas no processo de saída.

As falhas de entrada correspondem aos dados recebidos, e no caso de produto mecatrônico, principalmente os dados recebidos dos sensores. O quadro 3 ilustra os principais modos de falhas de entrada de dados do software.

Quadro 3 – Modos de falhas de entrada de dados

O dado está invertido e fora do lugar
O dado é redundante
O dado está incompleto
Existe erro no dado de precisão
O dado está fora do intervalo
Existe erro no formato do dado
As entradas corretas são recusadas
O intervalo está correto, mas o valor do dado está errado.

Fonte: (HUANG, ZHANG, LU, 2009)

Os autores Huang, Zhang e Lu (2009) consideram os modos de falha de entrada de arquivo como modos de falhas especiais, que podem ser agrupados conforme ilustra o quadro 4.

Quadro 4 – Modos de falhas de entrada de arquivo

O nome do arquivo está errado
O nome do arquivo é inválido
Não existe o arquivo
O arquivo está aberto
O formato do arquivo está errado
O formato do arquivo está inválido
A cabeça ( <i>head</i> ) do arquivo está errada
O término do arquivo está errado
A extensão do arquivo está errada
O dado do arquivo está faltando informação correta.
A informação do dado do arquivo está errada

Fonte: (HUANG, ZHANG, LU, 2009)

As falhas do processo correspondem ao processamento da informação, cujo resultado é o sinal de saída. Essas correspondem às ações de controle que devem ser executadas pelos atuadores.

Segundo Goddard (2000), a análise de falha em sistema de software deve ser realizada no início do processo de projeto, tanto quanto possível, para minimizar o impacto das recomendações de projeto resultantes da análise.

Os elementos de software são tratados como caixas-pretas que contém o código de software desconhecido, mas que implementam os requisitos atribuídos ao elemento. Os modos de falha a serem aplicados a cada elemento de software incluem: falha do elemento de software para executar, execução incompleta produzindo resultado funcional incorreto e tempo de execução incorreto.

Falha do software para executar, bem como execução incompleta, são particularmente importantes para sistemas em tempo real. O potencial de “envelhecimento” de dados desse sistema, ocasionado por propagações de erros latentes existentes no software, deve ser cuidadosamente avaliado.

Além dos modos de falha para cada elemento de software, o analista deve avaliar a capacidade do projeto de software para proteção contra falhas do sistema em hardware e software. Como ilustra o quadro 5, no nível de sistema, os modos de falha em software avaliam a capacidade do sistema em fornecer proteção contra o comportamento relacionado à interrupção incorreta, conflitos de recurso e erros do sensor de entrada e circuitos de controle de saída.

Quadro 5 – Modos de falhas de software no nível de sistema

Modos de falhas do elemento	Falhas para executar
	A execução está incompleta
	A saída está incorreta
	O tempo está incorreto
Modos de falha do sistema	O valor de entrada está incorreto
	O valor de saída está corrompido
	A interrupção foi bloqueada
	O retorno da interrupção está incorreto
	Existe erros de prioridade
	Existe conflito de recursos

Fonte: (GODDARD, 2000)

## 2.4 MODOS DE FALHAS EM SENSORES E ATUADORES

Erros originados dos sensores afetam a informação dos dados de entrada para processamento e, como consequência, podem ser geradas ações de controle

inadequadas que vão afetar a confiabilidade do produto mecatrônico. De modo semelhante acontece com os atuadores em que as ações de controle enviadas corretamente para os atuadores são executadas de forma errada, afetando também a sua confiabilidade. A seguir são detalhados os principais erros encontrados nos sensores e atuadores visando conhecê-los para evitá-los já nas fases iniciais de projeto.

As condições de armazenamento constituem o limite não operacional ambiental a que o sensor pode ser submetido durante um período de tempo, sem alteração permanente do seu desempenho, em condições normais de operação. Normalmente, essas condições incluem entre outros, a maior e menor temperatura de acondicionamento e a máxima umidade relativa do ar. Pressão, vibração, campos eletromagnéticos, atmosfera oxidante ou redutora, também afetam o desempenho.

Dependendo da natureza do sensor, o seu sinal de saída pode aumentar ou diminuir. Isso, como destaca Fraden (2004), pode ser descrito como um ruído de frequência ultra baixa.

A estabilidade do sensor em longo prazo pode estar relacionada ao envelhecimento dos seus materiais. Esta é uma mudança irreversível nos materiais elétrico, mecânico, químico, ou nas propriedades térmicas. A estabilidade em longo prazo é muito importante para os sensores utilizados para medições de precisão. Desse modo, o envelhecimento depende fortemente das condições ambientais de operação e acondicionamento. Como medida preventiva, os componentes do sensor devem ser isolados do meio ambiente e, os materiais utilizados na sua fabricação, selecionados adequadamente de modo a resistir aos agressores ambientais. O fenômeno do envelhecimento é típico de sensores com componentes orgânicos e, em geral, não é problema para sensores fabricados apenas com materiais não orgânicos. Os termistores de óxido de metal, revestidos com vidro, por exemplo, apresentam maior estabilidade em longo prazo, quando comparados com termistores revestidos com epóxi.

Um meio para melhorar a estabilidade é submeter o componente a condições extremas, como exemplo, oscilar de temperaturas baixas a temperaturas elevadas. Esse envelhecimento acelerado não só aumenta a estabilidade das características

do sensor como também melhora a confiabilidade, uma vez que o processo de envelhecimento, destaca Fraden (2004), revela muitos defeitos ocultos.

As condições ambientais às quais o sensor é submetido não incluem as variáveis por ele medida. Por exemplo, um sensor de pressão de ar normalmente não é submetido apenas à pressão de ar, mas também é exposto à temperatura do ar e dos componentes circunvizinhos, a exemplo de umidade, vibrações, radiações ionizantes, gases oxidantes, campos eletromagnéticos, forças gravitacionais, etc. Além disso, condições ambientais são de natureza multiplicativa, ou seja, alteram a função de transferência do sensor. Por exemplo, o medidor de tensão resistivo altera sua sensibilidade com o aumento da temperatura.

A estabilidade ambiental é bastante ampla e, geralmente, é um requisito muito importante. Por exemplo, um acelerômetro piezoelétrico é capaz de gerar sinais espúrios se afetado pela mudança brusca na temperatura ambiente, descarga eletrostática, efeitos triboelétricos, vibrações de um cabo de conexão, interferência eletromagnética (FRADEN, 2004).

Na análise de projeto conceitual, os conceitos selecionados devem ser avaliados do ponto de vista desses fatores ambientais, procurando eliminá-los ou minimizá-los ou, já sabendo da existência deles, direcionar os estudos de projeto detalhado para impedir sua propagação.

Fatores devidos à temperatura são muito importantes para o desempenho do sensor. Eles devem ser conhecidos e levados em consideração. O alcance da temperatura operacional é a faixa de temperatura ambiente dada pelos seus extremos superior e inferior na qual o sensor mantém a sua precisão especificada. Muitos sensores mudam com a temperatura e suas funções de transferência também podem sofrer modificações. Elementos especiais de compensação são muitas vezes incorporados diretamente no sensor ou em circuitos de condicionamento de sinal, para compensar os efeitos da temperatura.

A maneira mais simples de especificar tolerâncias devido aos efeitos térmicos é utilizar o conceito de banda de erro. A faixa de temperatura operacional pode ser dividida em seções, enquanto a banda de erro é especificada em cada seção. Por exemplo, um sensor pode ser especificado para ter uma precisão de  $\pm 2\%$  no intervalo de  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $0^{\circ}\text{C}$ , e de  $+50^{\circ}\text{C}$  a  $100^{\circ}\text{C}$ ,  $\pm 1\%$  no intervalo de  $0 - 50^{\circ}\text{C}$ , e

$\pm 3\%$  além desses intervalos dentro dos limites operacionais especificados de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $150^{\circ}\text{C}$ .

Um erro de autoaquecimento pode também ser especificado quando um sinal de excitação é absorvido pelo sensor, mudando a sua temperatura a tal ponto que sua precisão torna-se comprometida. Por exemplo, um sensor de temperatura termistor requer passagem da corrente elétrica, causando dissipação de calor dentro do corpo do sensor. Em função da sua ligação com o meio ambiente, a temperatura do sensor pode aumentar devido a um efeito de autoaquecimento.

Onwubolu (2005) diz que os atuadores, tal como os sensores, são dispositivos de conversão de energia. Entretanto, os atuadores em sistemas mecatrônicos, convertem, em geral, energia elétrica em energia não elétrica. A potência do sinal de controle é baixa para excitar os atuadores, sendo necessários dispositivos adicionais para conversão de potência. Esses dispositivos podem ser relés e contadores, tiristores, triacs e transistores etc. Deste modo, os atuadores podem ser eletromecânicos, como os motores elétricos assíncronos, servo-motores ou motores de passo, ou as válvulas de controle eletromagnéticas, tipo solenoides, que normalmente trabalham na condição aberta ou fechada, ou com atuadores pneumáticos. Também podem ser utilizados atuadores hidráulicos quando se quer transmitir potências mais elevadas com grande aplicação na área industrial.

Como os sensores, os atuadores estão sujeitos às mesmas condições ambientais a que os sensores estão submetidos e, justamente por isso, as interferências deste ambiente devem ser avaliadas, uma vez que possuem a capacidade de comprometer o seu desempenho.

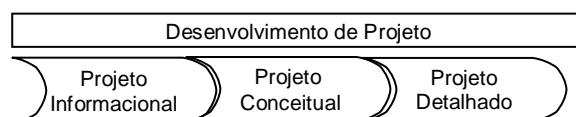
Os modos de falhas apresentados fornecem o conhecimento necessário para a identificação das falhas funcionais em potencial dos componentes que irão formar o produto mecatrônico. Esses componentes vão operar as subfunções do modelo funcional construído no projeto conceitual.

Um vez entendido como ocorrem os modos de falhas e como eles podem contribuir na prevenção da sua incidência já na fase de projeto conceitual, é necessário entender o processo de projeto para poder tratar o problema da confiabilidade. O capítulo seguinte descreve a maneira comumente utilizada no desenvolvimento do projeto de um produto.

### 3 PROJETO DE PRODUTO

O desenvolvimento do projeto de um produto é uma tarefa que vai desde o surgimento da ideia ou vontade de se ter um determinado bem até a sua conclusão, quando este está pronto para a fabricação. Existem diferentes modelos de desenvolvimento de produtos e o adotado nesse trabalho organiza o processo de projeto (figura 8) em três fases principais: projeto informacional, projeto conceitual e projeto detalhado (ROSEFELD et al, 2006).

Figura 8 – Processo de desenvolvimento de projeto



Fonte: (ROSEFELD et al, 2006)

O projeto informacional busca principalmente o levantamento das necessidades dos clientes, ou seja, os requisitos e desejos dos envolvidos com o produto em desenvolvimento. A execução eficiente dessa fase irá influenciar no sucesso do produto, uma vez que valoriza as ideias e requisitos fornecidos por aqueles que serão usuários e compradores do novo produto, não considerando apenas as ideias já concebidas de projetos anteriores originadas da “cabeça” do projetista.

O projeto conceitual define a concepção do produto a partir dos requisitos levantados no projeto informacional pela seleção dos melhores conceitos gerados. Essa fase caracteriza-se por um elevado nível de abstração, o que dificulta a avaliação da confiabilidade. Por conseguinte, os projetistas dedicam pouco tempo a essa fase, preferindo aplicar todo o seu conhecimento e tempo na fase seguinte, a do projeto detalhado. A razão disso é que, nesta fase a materialização do produto é elevada, o que permite aplicar as ferramentas estatísticas para cálculo da confiabilidade, conforme abordado anteriormente.

Na fase de projeto detalhado, como o próprio nome sugere, os conceitos selecionados na fase anterior são pormenorizados e as especificações dos componentes que irão compor o produto em desenvolvimento são geradas para



fabricação. Simulações são realizadas para verificação do desempenho do produto com envolvimento de vários projetistas (no caso de um produto mecatrônico de projetistas multidomínios). Caso modificações sejam necessárias sua execução impactará significativamente nos custos de desenvolvimento do produto.

Faz-se necessário aqui descrever a elaboração do projeto informacional e projeto conceitual, uma vez que se relacionam diretamente com o objetivo da pesquisa. Mesmo considerando a importância do projeto detalhado sua abordagem não será contemplada.

### 3.1 PROJETO INFORMACIONAL

O objetivo do projeto informacional é obter as especificações de projeto do produto. Compreende a fase inicial de projeto em que se buscam todas as informações necessárias para o desenvolvimento do produto. É necessário avaliar, entre as ideias inicialmente reunidas, as que são realmente viáveis para o desenvolvimento do projeto. Naturalmente, deve-se fazer uma análise da viabilidade econômica, como sugerido por Rosenfeld et al (2006) e Pahl et al (2005).

Uma vez definida a ideia do produto, é necessário levantar às necessidades dos clientes, ou seja, as expectativas e desejos das pessoas que irão se envolver com o produto. Esse processo envolve os usuários do produto, pessoal de fabricação, *marketing*, vendas, operação/manutenção e projetistas, para que as diversas perspectivas envolvidas em todo o ciclo de vida do produto sejam contempladas. Trata-se de uma tarefa muito importante porque clarifica a ideia do novo produto com aspectos multidisciplinares e diferentes visões, tirando do projetista os vícios das concepções já formadas na sua mente, oriundas de projetos anteriores. O objetivo principal, então, é descobrir as necessidades que, além de satisfazer, possam deixar os clientes extasiados, maravilhados. O levantamento das necessidades dos clientes é importante para o aumento da confiança no desempenho e sucesso do produto, e por conseguinte, da sua confiabilidade.

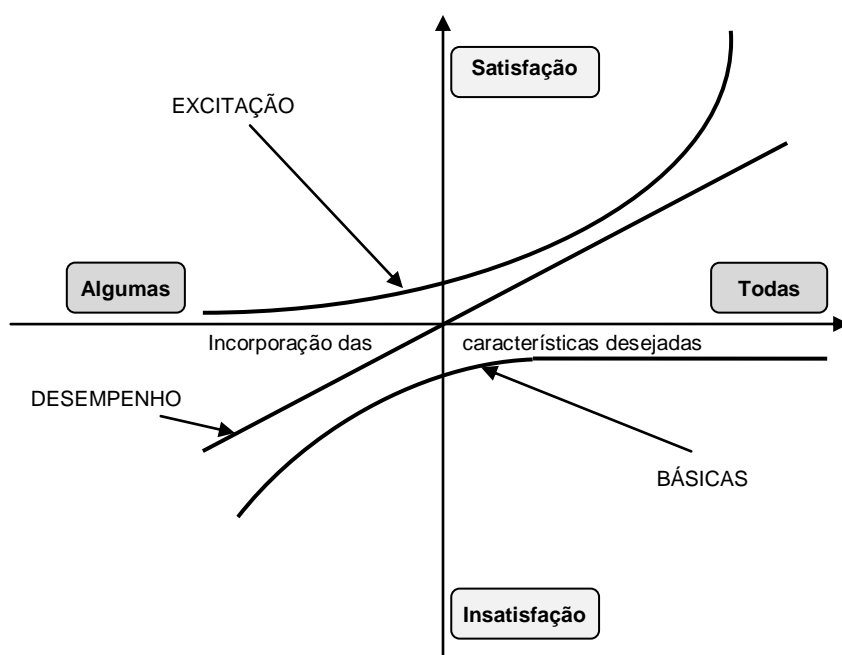
O modelo Kano (figura 9) representa a percepção do cliente sobre a qualidade de um produto. As expectativas básicas nem sempre são percebidas, mas, se elas não constam do produto, provocam uma grande insatisfação no cliente. Contrariamente, sua presença é considerada uma coisa normal e não

contribui para aumentar a sua satisfação. Em outro extremo, existem os fatores de excitação que provocam grande satisfação, quando estão presentes no produto. Sua ausência, porém, não causa insatisfação. Isso acontece, de acordo com Baxter (2008), porque os fatores de excitação são requisitos adicionais que excedem aqueles da expectativa básica.

Por outro lado, existem requisitos com desempenho esperado, que normalmente são manifestados pelo cliente e, quanto maior for o desempenho no produto final, maior será o nível de satisfação do cliente.

O principal objetivo, no levantamento das necessidades do cliente é encontrar aqueles requisitos ocultos, poucas vezes manifestados, os desejos latentes. Estes superam as expectativas do cliente quando existem no produto final, ao mesmo tempo em que são determinantes para o desejo de possuí-lo, pois geram benefícios que não foram anteriormente imaginados. No caso de um produto mecatrônico, a evolução rápida da tecnologia provoca o envelhecimento do produto existente e requisitos que antes excitavam o cliente passam a serem requisitos básicos e, enquanto novos requisitos, que agora podem excitá-lo, devem ser descobertos para manter a atratividade do produto.

Figura 9 – O modelo Kano de satisfação do cliente



Fonte: (BAXTER, 2008)

Em um mercado globalizado e altamente competitivo, como o atual, o levantamento das necessidades do cliente constitui um procedimento importante para aumentar a competitividade do produto no mercado. Várias são as ferramentas utilizadas para efetuar-lo, tais como *brainstorming*, entrevistas, questionários, entre outros (ROZENFELD et al, 2006), (PAHL et al, 2005).

As necessidades do cliente podem estar associadas aos aspectos funcionais básicos e essenciais do produto ou aos aspectos operacionais que provêm das atividades de apoio para a realização da função principal do produto. Aspectos associados também a fatores humanos, propriedades, espaço, confiabilidade, ciclo de vida, recursos e manufatura devem ser levados em consideração.

Para cada necessidade do cliente levantada, é definido o grau de importância que corresponde a uma nota variando de um a cinco, de acordo com o valor que o cliente considera para cada uma delas. Tais necessidades estão em uma linguagem de vocação da vontade dos clientes e, na maioria das vezes, podem não conter elementos mensuráveis. É imprescindível levantar os requisitos de engenharia que irão atender a essas necessidades.

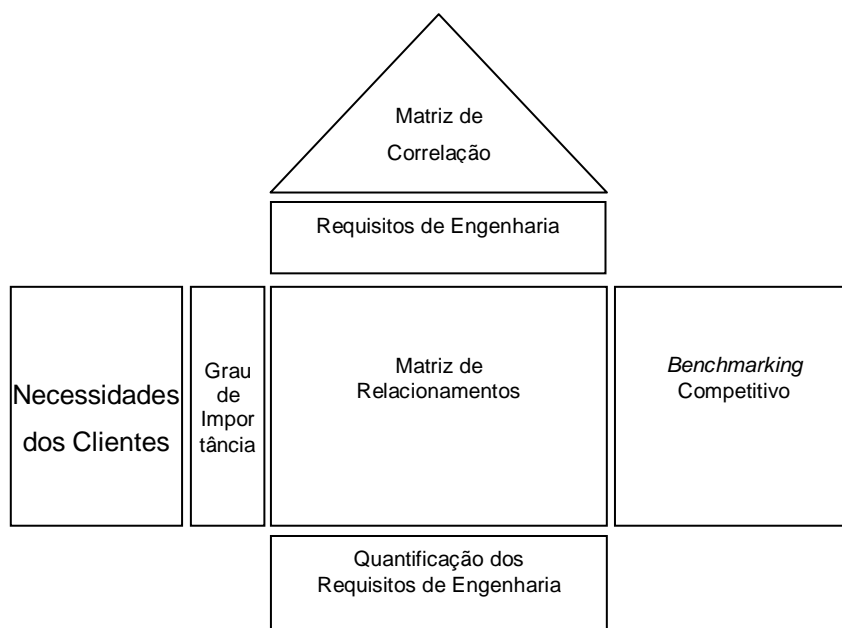
Esses requisitos podem ser analisados em uma lógica hierárquica, possibilitando a compreensão e entendimento da “voz do cliente” em uma linguagem de engenharia que possibilite encontrar a funcionalidade do produto. O desdobramento da função qualidade (*Quality Function Deployment – QFD*) é um dos métodos utilizados para relacionar as necessidades dos clientes aos requisitos de engenharia (ROTONDARO et al, 2010).

A figura 10 ilustra a casa da qualidade (QFD) utilizada para o relacionamento entre as necessidades do cliente e os requisitos de engenharia. Na primeira coluna, à esquerda, são relacionadas todas as necessidades dos clientes levantadas, e na segunda, também à esquerda, é incluído o grau de importância de cada necessidade.

Na terceira e demais colunas, estão relacionadas os requisitos de engenharia. No cruzamento de cada necessidade do cliente com o correspondente requisito de engenharia é colocado o fator de relacionamento, que define o quanto aquele requisito impacta naquela necessidade.

Na última coluna, à direita, é informado o *benchmarking* dos produtos concorrentes.

Figura 10 – A matriz casa da qualidade



Fonte: (ROSENFELD et al, 2006)

O fator de relacionamento define o quanto um requisito de engenharia influencia na necessidade do cliente. Quando esse relacionamento é forte assume-se a nota cinco. Contrariamente, se um requisito de engenharia tem pouco impacto em uma necessidade, então, considera-se a nota um. O Quadro 6 é ilustrativo:

Quadro 6 – Grau de relacionamento entre requisitos de engenharia e necessidades dos clientes.

Grau de Relacionamento	Símbolo	Nota
Forte	●	5
Médio	⊙	3
Fraco	○	1

Fonte: (MASCARENHAS, 2007).

A matriz de correlação – telhado da casa da qualidade – identifica os possíveis conflitos existentes nos requisitos de engenharia. Esses conflitos podem ser positivos, ou seja, o aumento do valor de um requisito implica no aumento do outro. Também podem ser negativos, de tal forma que um aumento de um requisito diminui o desempenho do outro.

Na penúltima linha da casa da qualidade, é obtido o índice de importância técnica pelo somatório da multiplicação do fator de relacionamento pelo grau de importância da necessidade do cliente. Na última linha, os requisitos de engenharia são classificados em ordem decrescente do índice de importância técnica. Este ranqueamento norteará as etapas seguintes de projeto.

### 3.2 PROJETO CONCEITUAL

A fase de projeto conceitual compreende a definição da concepção, exploração, avaliação e seleção das alternativas de projeto para atendimento dos requisitos de engenharia levantados na fase anterior. Com efeito, é a fase de projeto mais importante, por impactar acentuadamente nos custos do ciclo de vida do produto, que vai desde a fase inicial de Projeto Informacional até a sua obsolescência e descarte.

A fase de projeto conceitual é responsável por 5% do custo do produto, podendo determinar 75% do custo de fabricação e 80% do desempenho da confiabilidade do produto (GOEL, GRAVES, 2007).

Como regra geral, aceita-se na indústria, que cerca de 66% do custo do ciclo de vida do produto é determinado na fase de projeto conceitual. Uma vez que a confiabilidade é muitas vezes o principal indutor de custos, o projeto conceitual apresenta uma grande oportunidade para melhoria da confiabilidade (ORMON, CASSADY, GREENWOOD, 2001).

Feng e Song (2000) afirmam que erros cometidos durante as fases iniciais de projeto tendem a contribuir com cerca de 70% dos custos de produção. As mesmas considerações são feitas por Jim, Kim e Daneshi (2006), que acrescentam que as decisões tomadas na fase de projeto conceitual têm um impacto significativo na fase de projeto detalhado e processos de fabricação. Em síntese, há concordância entre os autores de que as decisões tomadas no projeto conceitual têm impacto extremamente relevante no ciclo de vida do produto e, por consequência, na sua confiabilidade.

Mesmo com os recentes avanços tecnológicos de software para projeto, fabricação, análise de engenharia, a tomada de decisões na fase inicial ainda é difícil, uma vez que envolve uma compreensão e previsão dos fatores de fabricação,

qualidade, confiabilidade e facilidades de manutenção. Portanto, avaliar os aspectos de confiabilidade na fase de projeto conceitual tende a contribuir significativamente na redução dos custos do ciclo de vida do produto.

Devido ao elevado grau de abstração inerente a esta fase do projeto, o que se consegue é ter ideias das funções que o produto deve desempenhar para atender as necessidades dos clientes. As ligações das funções ocorrem por meio dos fluxos de material, energia e sinal. A representação gráfica do conjunto de funções e fluxos, por sua vez, é o modelo funcional do produto em desenvolvimento.

O modelo funcional é uma descrição do produto quanto às operações elementares ou funções requeridas para transformar o fluxo de entrada de energia, material ou sinal, no fluxo de saída desejado. O fluxo é o material, energia ou sinal que afeta o produto, enquanto a função é a operação pela qual o produto executa o fluxo para transformá-lo do seu estado de entrada para o seu estado de saída. A Figura 11 ilustra a representação esquemática da função global nesse nível de abstração.

Figura 11 – Representação esquemática da função global



Fonte: (ROZENFELD et al, 2006)

A partir da Função Global, que é a mais representativa da funcionalidade do produto, é elaborado o modelo caixa preta (McADAMS, STONE, 2000). Para cada necessidade do cliente levantada, uma entrada no modelo caixa preta é implementada (figura12), de acordo com os fluxos anteriormente expostos.

Figura 12 – Modelo caixa-preta



Fonte: (ROZENFELD et al 2006)

Uma vez elaborado o modelo caixa preta, a etapa seguinte é o desdobramento da função global em subfunções até o nível de funções elementares. Esse procedimento irá facilitar o levantamento dos Sistemas, Subsistemas e Componentes (SSCs), para atender os objetivos da função global na busca de alternativas de projeto que atendam as subfunções e, conseqüentemente, a função global (ROZENFELD et al, 2006). As funções principais são subfunções que servem diretamente à função global, enquanto as funções secundárias, no sentido de funções auxiliares, somente contribuem indiretamente (PAHL et al, 2005).

As funções representam a relação existente entre a entrada e a saída de um sistema ou as transformações de um estado para outro. Elas são definidas por meio de um predicado, formado por um verbo e um substantivo, a exemplo de dosar fertilizante, lavar roupa, sentir *status*, converter *status* ou processar *status*.

Normalmente, a linguagem utilizada na elaboração do modelo funcional é livre e informal, e isso acarreta problemas de comunicação entre projetistas, principalmente no caso de desenvolvimento de um produto mecatrônico, em que a interação entre os domínios, mecânico, eletrônico, software e controle é determinante. Uma linguagem formal possibilita e facilita o entendimento entre os diferentes domínios em todas as fases de projeto.

A base funcional, como define McAdams e Stone (2000), é uma linguagem formal desenvolvida para elaboração do modelo funcional, é composta de oito classes de funções, primárias, utilizadas para definir as operações do fluxo. Estas classes de funções são: Ramificar, Conduzir, Conectar, Magnitude de Controle, Converter, Fornecer, Sinalizar e Apoiar.

Para cada classe de funções primárias, existem funções secundárias e terciárias correspondentes, as quais possibilitam uma variedade de opções para representar as funções do modelo funcional.

Para a representação do fluxo são identificadas três classes de fluxos primários: Material, Energia e Sinal, que são complementados por fluxos secundários e terciários, que possibilitam uma variedade de opções para representar os fluxos do modelo funcional.

O modelo funcional elaborado a partir do desdobramento da função global atende a maioria dos projetos eletromecânicos. Entretanto, para o desenvolvimento de um produto mecatrônico, onde ocorre o processamento da informação, é

necessária a compreensão dos requisitos para elaboração do software e da lógica de controle.

### 3.2.1 Software e Lógica de Controle do Produto Mecatrônico

A engenharia de software usa, no desenvolvimento conceitual, a linguagem UML, enquanto a engenharia de controle entende o comportamento dinâmico do sistema através dos blocos de funções (*Function Blocks*). A partir do modelo funcional, os princípios de soluções são sistematizados na matriz morfológica.

A engenharia de software utiliza cada vez mais os paradigmas da orientação a objeto para o desenvolvimento dos seus requisitos. Os motivos atraentes para o sucesso da orientação a objetos estão relacionados aos benefícios que ela garante em termos de modularidade de programas e de reutilização do código.

A linguagem de modelagem dominante para o software orientado a objeto é a *Unified Modeling Language* (UML), que é apoiada por várias ferramentas de desenvolvimento comercialmente disponíveis para geração do código. Trata-se de uma linguagem que tem sido aplicada em projeto de sistemas em tempo real e sistemas distribuídos críticos de segurança (BONFÉ, FANTUZZI, SECCHI, 2007).

A UML, de acordo com Tranoris e Thamboulidis (2003), é utilizada para visualização, especificação, construção e documentação dos artefatos do sistema, fornecendo uma maneira padronizada para a atividade conceitual das funções de processo e sistema.

Mais recentes são as aplicações dos princípios da UML e orientação a objeto no projeto de software de controle para sistemas de fabricação, devido às limitações das linguagens de programação para os dispositivos de controle industrial. Isso, segundo Bonfé, Fantuzzi e Secchi (2007), tem sido reforçado pelas ferramentas de desenvolvimento de software modular, como os blocos de funções (*Functions Blocks*) descritos na norma IEC-61131-3 (2003), para programação de PLC, e na norma IEC-61499-1 (2005), para os sistemas de controle distribuído.

A UML apoia a especificação dos requisitos funcionais com um número de visualizações gráficas, os diagramas de caso de uso, os diagramas de classe, os diagramas de sequência, etc, que são essenciais para o projeto de software (SECCHI, BONFÉ, FANTUZZI, 2007).



Os diagramas anteriormente citados, costumam ser plenamente compreendidos pelos engenheiros de software, ao passo que os engenheiros de controle apresentam dificuldades para entendê-los. Eis mais um grande desafio do desenvolvimento do projeto conceitual de um produto mecatrônico.

Para o projeto do sistema de controle, é necessária a modelagem do comportamento do sistema, ou seja, como o sistema muda o seu estado em função de ações e respostas a estímulos (eventos) externos. O desenvolvimento desse modelo requer a utilização dos *statecharts* que são uma extensão do formalismo convencional de máquinas de estado e diagramas de estado proposto por Harel (1987), e inserido na UML 2.0 (SILVA, 2010). Esses diagramas permitem o engenheiro de controle compreender o comportamento dinâmico do sistema e desenvolver o sistema de controle do produto.

Um sistema de software pode ser descrito por meio de vários diagramas, que permitem especificar:

- a) As propriedades estruturais do sistema, modelado com os diagramas de classe, as classes objeto com seus atributos, operações, e os relacionamentos entre elas; (associação, agregação, composição, generalização e dependência);
- b) O comportamento de objetos, tanto o comportamento individual (isto é, interno), que pode ser modelado por meio dos gráficos de estado (*Statecharts*) ou o comportamento interativo, troca de pedidos de operações e respostas, que pode ser descrito por meio dos diagramas de sequência e diagramas de colaboração.

As linguagens utilizadas para o projeto conceitual de produto mecatrônico devem ser tão formais e claras quanto possível. A lacuna do formalismo pode ser suprida pelos mecanismos de extensão inseridos na UML, chamados de estereótipos. Estes podem ser utilizados para o mapeamento de linguagens de domínio específico (HEVERHAGEN, TRACHT, 2001).

A extensão da linguagem de modelagem da UML pode ser adotada para descrever sistemas físicos complexos controlados por computador. A abordagem

permite unificar os conceitos utilizados no projeto de software com aqueles empregados em modelagem de sistemas, que é a orientação a objetos.

A notação padrão da UML ajuda a incrementar as abordagens multidisciplinares para o projeto de controladores lógicos programáveis dos processos industriais e sistemas mecatrônicos. É possível obter um modelo modular de sistema onde os componentes físico e lógico e o protocolo através do qual eles trocam informações podem ser claramente distinguidos. Os diagramas de classe são apropriados para descrever a estrutura estática do código. Usando os estereótipos, a classe e sua relação com outras classes podem ser modeladas (HEUSER, WITSCH, KATZKE, 2005).

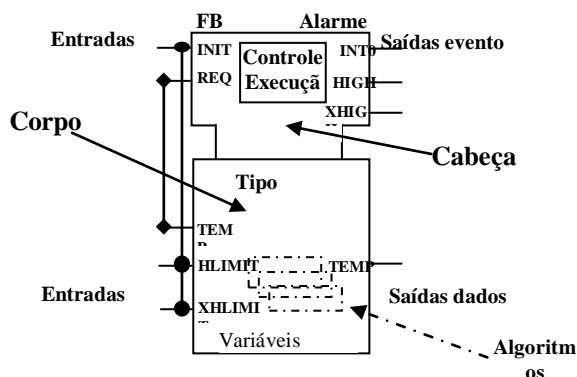
O desenvolvimento da lógica de controle é sistematizado na norma IEC-61131-3 (2003). Nessa norma, os blocos de funções (FB - *Function Blocks*) permitem definir os tipos de dados e construir as estruturas da lógica de controle. A classe UML com seus atributos e operações pode, de acordo com Thramboulidis (2005), ser transferida para um conjunto de blocos de funções.

As classes incluem os métodos e a definição dos tipos de atributos. A definição do tipo de métodos consiste de ocorrências nos FB que executam os métodos da classe. A definição dos tipos de atributos encapsula todos os atributos públicos da classe com seu tipo de dado. Então, um tipo de definição adicional para os atributos privado é inserido.

Três tipos de classe especial com relevância para a tecnologia de automação são utilizados na modelagem: entidade, controle e serviço. A classe entidade é usada no gerenciamento central de dados, e transportam vários atributos e pouco ou nenhum método. As funcionalidades reutilizáveis são consolidadas na classe serviço. A classe controle lida com o controle central das tarefas. Dentro do diagrama de classe, elas desempenham um papel condutor, usando variáveis da classe entidade e métodos da classe serviço para a delegação de tarefas.

O FB é um mecanismo de abstração que permite o encapsulamento do algoritmo de controle, de modo a facilitar a compreensão e aplicação dos engenheiros de controle, os quais não são especialistas no desenvolvimento de algoritmos. Um FB consiste de um “corpo” e uma “cabeça” (figura 13).

Figura 13 – Representação gráfica do bloco de função (FB) da IEC 61499



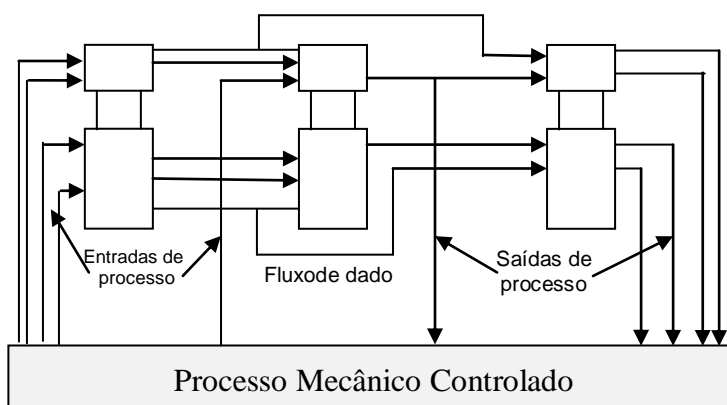
Fonte: (THAMBOULIDIS, PERDIKIS, KANTAS, 2007)

A “cabeça” é conectada aos fluxos de eventos, enquanto o “corpo” se relaciona com os fluxos de dados. A funcionalidade do FB é fornecida por meio de algoritmos que processam entradas e dados internos e geram dados de saída.

O sequenciamento de invocações do algoritmo é definido na especificação do tipo bloco de função usando uma variante do *statecharts* denominada gráfico de controle de execução (*Execution Control Chart – ECC*).

A aplicação de controle é definida como um gráfico de ocorrências de FB interconectados que colaboram para fornecer o comportamento necessário para controlar o processo mecânico (figura 14).

Figura 14 – A aplicação de controle como uma rede de ocorrências de blocos de funções (FB) interconectados.



Fonte: (THAMBOULIDIS, PERDIKIS, KANTAS, 2007)

Uma vez elaborado o modelo funcional, onde são identificadas todas as subfunções necessárias para operar os fluxos de entrada até as saídas, abrangendo

todos os domínios do produto mecatrônico e fornecendo uma visão geral da sua funcionalidade, agora podem ser definidos os Sistemas, Subsistemas e Componentes (SSCs), para atender as subfunções do modelo funcional.

Para cada subfunção, são levantadas as alternativas de projeto, concepções, e possíveis soluções individuais. Os princípios de solução podem ser obtidos por meio de um banco de dados de princípios cadastrados, catálogos ou lista de materiais. Para isso, podem ser utilizados os métodos intuitivos de criatividade, tais como: *Brainstorming*, Método 635, Pensamento Lateral (*Lateral Thinking*), Sinérgico e Galeria, ou os métodos morfológicos: Análise e Síntese Funcional, Análise Sistemática, Análise de Valor, Questionários e *Checklist*.

Importa, no entanto, destacar a análise e síntese funcional, a qual permite a construção da matriz morfológica que vai relacionar para cada subfunção do modelo funcional os possíveis SSCs que podem vir a constituir o produto mecatrônico, sendo, portanto, mais útil à situação específica aqui estudada.

A sistematização dos princípios de solução é realizada na matriz morfológica (figura 15), a qual é composta de linhas que representam as subfunções do modelo funcional. Já as colunas constituem as alternativas dos princípios de soluções individuais levantadas.

Figura 15 – Exemplo de matriz morfológica

Funções	Princípios soluções	1	2	--	J	...	M
1	F1	S11	S12		S1j		S1m
2	F2	S21	S22		S2j		S2m
...							
I	Fi	Si1	Si2		Sij		Sim
...							
N	Fn	Sn1	Sn2		Snj		Snm

1                      2  
 Combinação de princípio

Fonte: (ROZENFELD et al, 2006)

Como pode ser observado, existem várias combinações possíveis de soluções individuais capazes de formar o princípio de solução total para atender à função global. Uma vez selecionadas as alternativas de projeto, o procedimento seguinte é a análise de cada uma delas, para tomada de decisões, sob os aspectos críticos observados no ciclo de vida do produto, como: questões de funcionamento, fabricação, montagem, desempenho, qualidade, custos, ergonomia, estética e descarte. Existem matrizes de suporte ao processo de tomada de decisão, tais como, a Matriz de Análise das Necessidades, Método de Pugh, Método de Macbeth, entre outros.

A alternativa de projeto selecionada com base no modelo funcional elaborado segue para a fase de projeto detalhado onde acontece a materialização do produto.

### 3.3 PROJETO DETALHADO

O projeto detalhado tem como objetivo desenvolver e finalizar todas as especificações do produto para então serem encaminhadas à fabricação. Nessa fase, são elaboradas todas as especificações técnicas necessárias à fabricação do produto, como a normalização, análise detalhada, técnicas de representação, especificações para aquisição de componentes, análise detalhada e quantificada da confiabilidade. Para isso, são utilizadas ferramentas avançadas de modelagem e simulação do produto em desenvolvimento, visando conhecer todos os possíveis obstáculos que possam impedir o funcionamento e desempenho do produto mecatrônico. Entre elas, podem ser citadas: *Computer Aided Design* (CAD), *Computer Aided Engineering* (CAE), *Computer Aided Process Planning* (CAPP), *Computer Aided Manufacturing* (CAM).

No projeto detalhado tem-se a elaboração dos desenhos técnicos, construção de protótipos, análise de falhas e os resultados dos testes. Nessa fase, são tomadas as decisões para as especificações dos materiais, procedimentos de fabricação e montagem e também utilização de componentes padronizados ou novos componentes. O resultado final é a especificação do produto para a fabricação.

Para melhor compreender o processo de projeto, o capítulo seguinte apresenta algumas abordagens na tentativa de ampliar os aspectos de confiabilidade ao longo do desenvolvimento do projeto de um produto.

## 4 ABORDAGENS DE CONFIABILIDADE

Uma das principais preocupações da pesquisa esteve relacionada ao desenvolvimento e aprimoramento da fase de projeto conceitual, a qual também tem influenciado diversos outros estudos. Estes buscam encontrar soluções criativas para melhorar o desempenho dessa fase, tornando, assim, o seu uso consistente e motivador.

Abordar a confiabilidade em projeto conceitual significa avaliar as possíveis falhas funcionais em potencial, às quais podem ser submetidos os conceitos selecionados. Essa avaliação objetiva descartar antecipadamente aqueles conceitos não confiáveis e direcionar os estudos na fase de projeto detalhado para encontrar medidas mitigadoras, capazes de diminuir a probabilidade de falhas dos componentes selecionados.

Considerando o objetivo desse trabalho de pesquisa, apresentamos a seguir algumas abordagens referentes à confiabilidade em projeto conceitual.

### 4.1 MODELAGEM DO CONCEITO DE PROJETO PARA MELHORIA DA CONFIABILIDADE

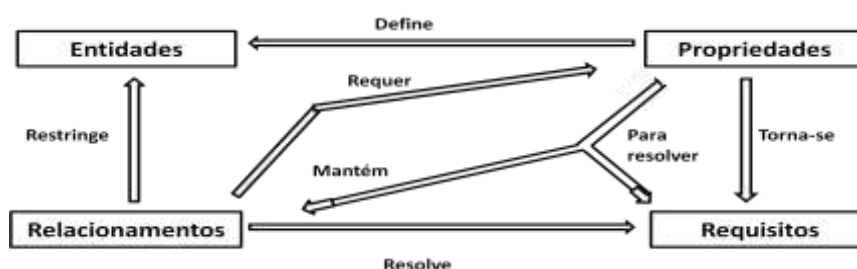
Smith e Clarkson (2005) desenvolveram um método de representação do conceito de projeto visando a confiabilidade e uma técnica de análise simples para avaliação qualitativa.

O método de representação se vale do termo grupo para descrever um conceito de projeto. Os grupos constituem uma coleção de entidades, relacionamentos, propriedades e requisitos, cuja inter-relação implica um conceito em análise. Este conceito é descrito utilizando um diagrama entidade-relacionamento (figura 16). Nesse diagrama, entidades descrevem as partes constituintes do conceito, a exemplo, características, componentes e conjuntos.

Os relacionamentos descrevem como essas partes se inter-relacionam de tal forma que o conceito exibe um comportamento desejado. Os relacionamentos quando funcionais, podem declarar o uso correto das entidades, sendo assim, podendo gerar restrições.

Os grupos também contêm os requisitos que o conceito deve atender. Esses requisitos tentam descrever completamente a funcionalidade necessária do conceito. As propriedades descrevem a funcionalidade de cada entidade. Propriedades são atribuídas ao grupo de entidades de tal forma que cada entidade nada mais é do que um conjunto de propriedades.

Figura 16– Entidades de grupo e ligações entre elas



Fonte; (SMITH, CLARKSON, 2005)

Os relacionamentos de alguma forma condicionam a utilização das entidades, pois cada uma tem de manter certos relacionamentos com outras entidades. Os relacionamentos também fazem uso do comportamento da entidade para resolver os requisitos, de modo que cada requisito é atribuído a, pelo menos, um relacionamento e vice-versa.

As propriedades são características comportamentais que uma entidade possui. Desde que somente este comportamento seja usado, as propriedades definem completamente as entidades.

Para esses autores, os grupos podem ser combinados em hierarquia e uma propriedade de um grupo pai é convertida em um requisito de um grupo filho. Com isso, as propriedades tornam-se requisitos. Uma vez levantado os conceitos de grupo, o próximo passo do método é a técnica de análise para revelar as possíveis falhas funcionais em potencial.

A técnica de análise, por sua vez, atua nas falhas de conceito as quais ocorrem quando a funcionalidade essencial de uma entidade é afetada negativamente, de modo a evitar que o grupo atinja sua funcionalidade. A técnica de análise (figura 17) define três condições necessárias para acontecer uma falha potencial:

- a) Uma entidade necessita ser sensível a um efeito;
- b) Uma entidade deve ter um relacionamento que pode transferir esse efeito;
- c) Um relacionamento necessita estar associado com a entidade que produz o efeito.

Figura 17 – Condições para a falha



Fonte: (SMITH, CLARKSON, 2005)

Os efeitos originados de um item podem não estar descritos pela entidade de grupo. Por exemplo, a atmosfera ambiente está relacionada com todos os componentes que não foram isolados dela, mas este relacionamento é improvável de ser mencionado no grupo, mesmo que ele possa permitir a transferência do efeito indesejado, como oxidação, contaminação, etc. Assim, ao considerar falhas, deve-se tentar revelar todos os relacionamentos possíveis, especialmente aqueles ocultos não essenciais para o grupo de trabalho.

Uma vez determinados todos os relacionamentos associados a uma entidade, é preciso considerar as entidades aptas a transferir efeitos e os tipos de efeitos, sobretudo, os indesejáveis. Uma entidade pode tornar-se uma fonte indireta, se um efeito é transferido por ela à outra entidade.

Essa análise permitirá modificações na concepção do produto, eliminando possíveis falhas funcionais em potencial.

Essa abordagem pode auxiliar na identificação dos modos de falhas funcionais em potencial na fase de projeto conceitual e sua análise simples permite estender para os domínios da mecânica.

#### 4.2 NÚMERO PRIORIDADE (NP)

Na avaliação das alternativas de conceitos selecionados na fase de projeto conceitual, uma das tarefas mais importantes é a identificação dos modos de falhas



funcionais em potencial ou conhecido, e a melhoria do projeto pela eliminação deles. Nessa análise, segundo Hari e Weiss (1999b), os projetistas analisam a causa raiz de cada modo de falha e estimam a probabilidade de sua ocorrência e o impacto de seus efeitos. Para isso, são utilizadas experiências passadas de modos de falhas de componentes similares, obtidos, quando possível, de bancos de dados de registros de falhas. É necessário observar as causas de falhas comuns que muitas vezes passam despercebidas nessa análise. As principais delas, segundo Dhillon (1999), são:

- a) Ambiente externo - temperatura, umidade, vibração, poeira;
- b) Erros de operação e manutenção – desatenção, manutenção incorreta, calibração ou ajuste incorreto executado pelo homem;
- c) Deficiência no projeto do equipamento – equívoco durante a fase de projeto, por exemplo, a falha na consideração da interdependência entre as partes mecânica e elétrica;
- d) Eventos catastróficos externos – curto-circuito, fenômenos naturais (terremoto, fogo, tornado e inundação);
- e) Fonte de energia externa – unidades redundantes alimentadas da mesma fonte de energia podem falhar simultaneamente caso a fonte de energia comum falhe;
- f) Manufaturador – as unidades redundantes compradas do mesmo fabricante podem ter os mesmos vícios de projeto, fabricação ou outros defeitos.

As questões básicas que os projetistas procuram responder são indicadas por Hari e Weiss (1999a):

- a) Como pode o sistema falhar na execução de cada função? Ou seja, quais são os modos de falhas funcionais em potencial?;
- b) Quais são as causas e efeitos de cada modo de falha funcional em potencial?;
- c) Como pode a falha funcional em potencial afetar o cliente? A severidade da falha (S);

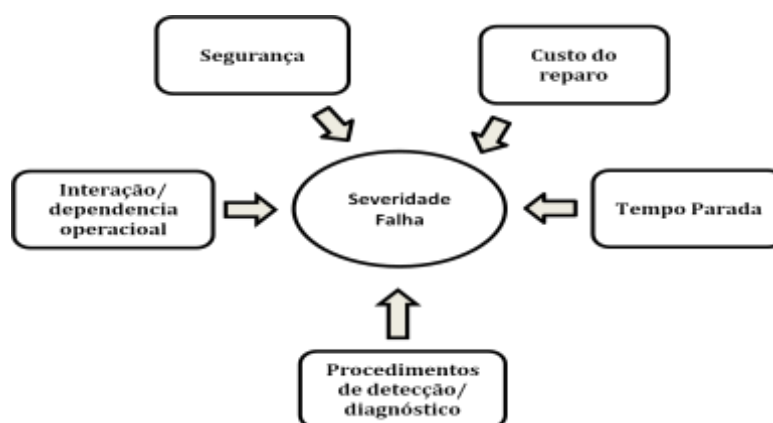
- d) Qual a probabilidade de ocorrência deste modo de falha funcional em potencial? A frequência de falha (F);
- e) Como pode ser detectado se o modo de falha funcional em potencial existe? A detecção da falha (D);
- f) Qual a prioridade para eliminação ou minimização do modo de falha em potencial? O número prioridade  $NP = S * F * D$ .

Com base nessas questões, os autores propõem a elaboração de uma lista de ações voltadas para a melhoria dos conceitos de projeto e classificada em ordem decrescente em relação ao número prioridade (NP). As informações da lista servem para eliminar os modos de falhas funcionais em potencial. Em alguns casos podem provocar a mudança do conceito em sua totalidade.

Em termos de produto mecatrônico, o processo de avaliação da severidade (S) perpassa cinco critérios (figura 18):

- a) A falha afeta a segurança das pessoas e/ou equipamentos no ambiente em que está inserido o produto mecatrônico;
- b) A falha provoca a parada do produto impedindo o seu funcionamento;
- c) É possível elaborar procedimentos de detecção e diagnóstico da falha;
- d) O custo para reparar a falha é elevado;
- e) A falha afeta a interação e dependência operacional do produto mecatrônico.

Figura 18 – Avaliação do critério de severidade



Fonte: (BEHBAHANI, SILVA, 2007).

A avaliação de todos esses fatores conduz à definição dos valores da taxa de severidade, os quais podem ser aplicados no cálculo do Número Prioridade (NP). O quadro 7 define critérios para o cálculo desses valores. É preciso destacar que, em projeto conceitual, um conceito com efeito de severidade Maior ou Perigoso deve ser expurgado, sem distinção entre ambos.

Quadro 7 – Escala de critério de severidade (S)

Efeito da severidade	Critério de severidade	Taxa de severidade	Percepção do cliente
Nenhum	Nenhum efeito	1	Sem efeito
Mínimo	Leves efeitos no desempenho do sistema	2	Ligeiramente irritado
Moderado	Desempenho do sistema degradado, mas operável e seguro.	4	Alguma inconveniência
Maior/Perigoso	Sistema inoperável, mas seguro, ou: Falha relacionada à segurança, não cumprimento de leis, regulamentações e normas.	10	Insatisfeito/ Perigoso

Fonte: (HARI, WEISS, 1999a)

Quanto à frequência de ocorrência dos modos de falhas funcionais, a avaliação da taxa de falha pode ser realizada segundo os critérios definidos no quadro 8. Ressalta-se que a probabilidade de ocorrência do modo de falha em potencial durante a vida útil pode ser tolerada quando for baixa. É preciso, no entanto, que as falhas sejam de gravidade menor. Portanto, existe uma ligação entre os valores de severidade e frequência de falha.

Quadro 8 – Escala de frequência de ocorrência de falhas (F)

Frequência de falha	Critério de falha	Taxa de falha	Falhas /vida útil
Raro	Improvável ocorrência de falha, histórico mostra nenhuma falha.	1	< 1
Pouco	Poucas falhas durante a vida útil	2	2 a 3
Médio	Número médio de falhas	4	4 a 10
Alto/Certo	Muitas falhas. Histórico de falhas existe de projetos similares	10	> 10

Fonte: (HARI, WEISS, 1999a)

A detecção de uma falha pode levar à sua correção ou eliminação. Quanto mais cedo for detectada uma falha, menor será seu dano junto ao produto. Mesmo

um modo de falha funcional em potencial grave pode ser removido sem desvantagem, se for detectado a tempo. O quadro 9 define valores para o cálculo da taxa de detecção.

Quadro 9 – Escala de detecção de falhas (D)

Fase detecção	Critério da fase de detecção	Taxa de detecção D
Cedo	Um método de detecção comprovada como: análise, simulação, modelos ou dados está disponível nos estágios cedo do projeto.	1
Protótipos subsistemas	Testes estão disponíveis nos subsistemas de protótipo ou de elementos de pré-produção	2
Protótipo produto	Testes estão disponíveis nos protótipos ou subsistema de pré-produção, ou nos testes acelerados de vida.	4
Final	Testes estão disponíveis somente após operação do produto final, ou nenhuma técnica de detecção está disponível.	8
Cliente	As falhas serão detectadas pelo cliente	10

Fonte: (HARI, WEISS, 1999b)

Essa abordagem considera as consequências dos modos de falhas funcionais em potencial possibilitando uma análise criteriosa na avaliação da confiabilidade. Entretanto, devido a necessidade de obtenção de um número maior de dados, torna-a laboriosa. a sua utilização.

#### 4.3 MÉTODO FUNÇÃO - FALHA

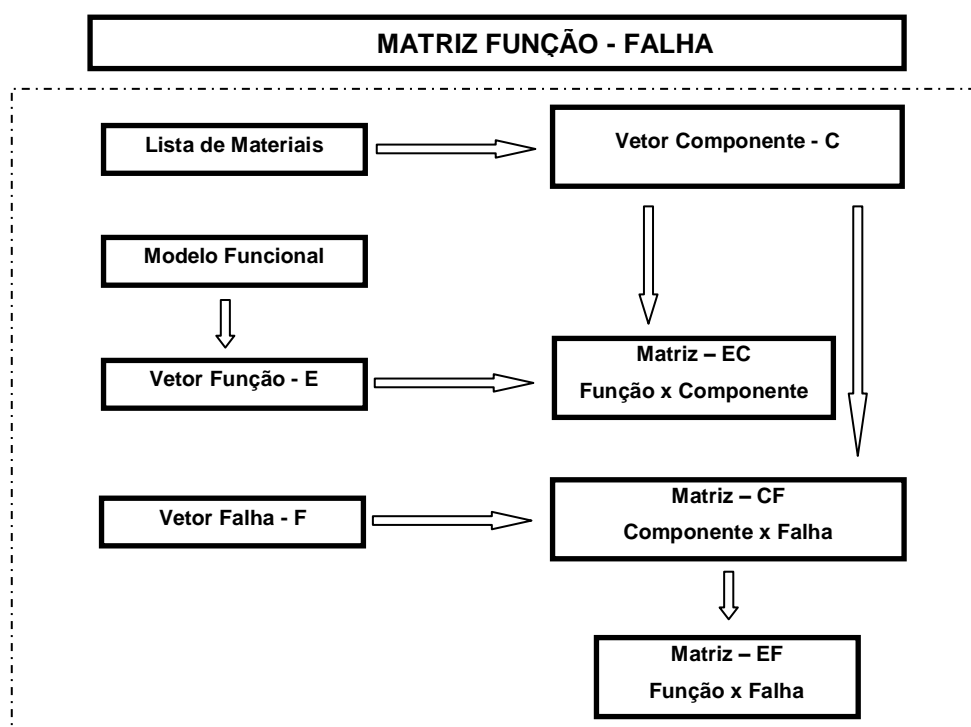
Poucos projetos de produto são verdadeiramente originais. Eles incorporam outros elementos de projeto de produtos anteriores, que fazem parte do conhecimento acumulado do corpo técnico da organização. O conhecimento das principais falhas relacionadas a cada domínio permite uma análise do modelo funcional para identificar as possíveis falhas funcionais em potencial e relacioná-las a cada subfunção do referido modelo. O objetivo é encontrar as possíveis falhas funcionais em potencial do produto em desenvolvimento.

Arunajadai, Stone e Tumer (2002) propuseram uma estrutura para criação de uma ferramenta de projeto - método Função-Falha -, baseada em funções para identificação de modos de falhas, pela multiplicação de matrizes (figura 19).

O método consiste na utilização da similaridade existente entre componentes para associar as subfunções identificadas no modelo funcional, este elaborado com o apoio da base funcional, com as falhas funcionais a que estas subfunções estão sujeitas ao longo do seu ciclo de vida (STONE, TUMER, WIE, 2003).

O método é construído a partir da elaboração da matriz Função-Componente, denominada de matriz EC, que relaciona as subfunções do modelo funcional com os Sistemas, Subsistemas, Componentes (SSCs). Uma vez levantado a matriz EC, o passo seguinte é encontrar os modos de falhas funcionais em potencial associados a cada SSCs, formando a segunda matriz do método, que é a matriz Componente – Falha, denominada de matriz CF.

Figura 19 - Método função - falha



Fonte: (STONE, TUMER, WIE, 2003)

A matriz função-componente é composta do vetor componente, obtido da lista de materiais, e do vetor função, obtido do modelo funcional. Na matriz função-componente, os componentes formam as n colunas da matriz e as subfunções formam as m linhas da matriz. Para um dado componente, é colocado na célula correspondente à subfunção "1", se ele executa aquela subfunção, ou "0", se ele

não a executa. O quadro 10 exemplifica essa matriz. Por exemplo, o componente “1” está associado à função “2”, enquanto o componente “2” se relaciona com as funções “1” e a função “4”.

A aplicação desse método a uma quantidade de produtos resulta na obtenção de várias matrizes função-componente, que podem ser agregadas em uma única matriz. A partir disso, formam uma categorização padronizada para combinar componentes similares em uma única linha desta matriz, associados a cada subfunção de um grupo de produtos. Esta matriz, no gerador de conceito estabelecido por Strawbridge, McAdams, Stone (2002) é chamada de matriz X.

Quadro 10 – Exemplo esquemático da matriz função-componente

Nome do produto						
Matriz Função- Componente (EC)	Componente 1	Componente 2	Componente 3	Componente 4	Componente ...	Componente n
	Função 1	0	1	0	0	0
Função 2	1	0	0	0	0	0
Função 3.	0	0	0	0	1	0
Função 4	0	1	1	0	0	0
Função .	0	0	0	0	0	0
Função m	0	0	0	0	0	1

Fonte: (ARUJANADAI, STONE, TUMER, 2002)

Essa matriz agregada pode ser cadastrada em um banco de dados de repositório de projeto, tornando a sua utilização dinâmica e de fácil acesso. Para isso, foi desenvolvido o *Design Repository*, banco de dados criado pela *Oregon University of United States of American*, onde estão cadastrados mais de seis mil e quinhentos produtos oriundos de diversas áreas. O banco de dados permite selecionar os produtos que se assemelham ao projeto do produto em desenvolvimento e extrair os componentes similares relacionados às subfunções do modelo funcional.

A matriz componente - falha (CF) é composta do vetor componente, obtido na matriz anterior, e do vetor falha, este último obtido através da análise da constituição

física dos componentes em relação aos modos de falhas funcionais identificados pela similaridade de componentes.

Finalmente, a matriz Função-Falha, denominada de matriz EF, é obtida pela multiplicação das matrizes anteriores, EC e CF. Com isso, consegue-se associar as subfunções do modelo funcional com as possíveis falhas funcionais.

$$\mathbf{Matriz\ EF = Matriz\ EC\ x\ Matriz\ CF}$$

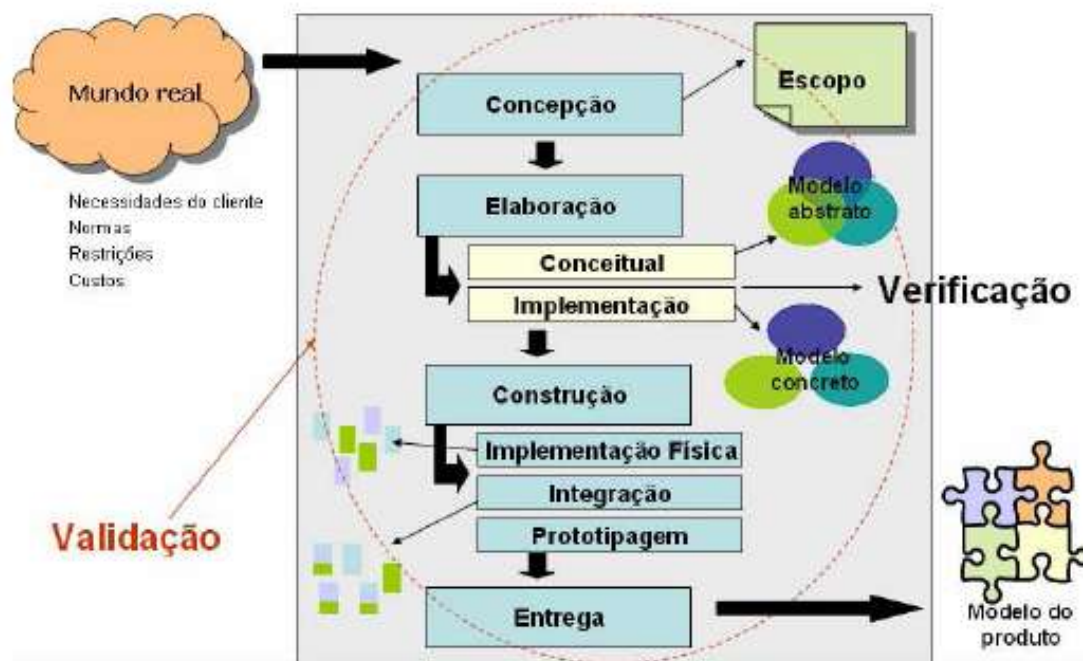
A matriz função-falha possibilita aos projetistas analisar os conceitos selecionados do ponto de vista da confiabilidade e, ao mesmo tempo, modificar aqueles que apresentam um potencial de falhas. Essa abordagem permite associar de forma simples as falhas funcionais com as funções do modelo funcional, possibilitando uma avaliação da confiabilidade. Entretanto, a construção das matrizes demanda um dispêndio de tempo inicial no seu desenvolvimento

#### 4.4 METODOLOGIA MdpM

Mascarenhas (2007) desenvolveu uma metodologia unificada para o desenvolvimento de produtos mecatrônicos, (MdpM) na qual procurou integrar a engenharia de *software* com a engenharia de produtos. Trata-se de uma metodologia ampla (figura 20), que aborda desde o entendimento preliminar do produto até a entrega do modelo do produto pronto para a fabricação. A autora argumenta que a utilização de uma linguagem de modelagem única e simples para o desenvolvimento do projeto de produto mecatrônico é muito importante para que possa ser facilmente compreendida por todos, uma vez que esse tipo de produto é multidisciplinar. Essa metodologia utilizou os princípios da Orientação a Objeto (O-O), sistematizada na linguagem UML 2.0, para desenvolvimento da modelagem de projeto.

A fase de concepção é a que gera o escopo do produto a ser construído. Mais do que isso, é o momento em que são levantadas as necessidades do cliente, a equipe de projeto conceitua o produto, são definidos os requisitos funcionais e não funcionais e identificados os fatores de risco, enfim, selecionados os requisitos necessários para o desenvolvimento e construção do produto mecatrônico.

Figura 20 – Metodologia MdpM



Fonte: (MASCARENHAS, 2007)

A elaboração é dividida entre o modelo conceitual, gerador do modelo abstrato do produto, e a implementação, que vai transformar esse modelo abstrato em um modelo concreto.

Na especificação conceitual, a arquitetura do produto é definida a partir da modelagem de classes que a compõe. Já o comportamento do produto é modelado a partir da identificação de aspectos dinâmicos. Especifica-se, então, como será o funcionamento do produto dentro do modelo estrutural projetado, ou seja, elabora-se o modelo funcional do produto mecatrônico em desenvolvimento. Esses modelos estruturais e comportamentais representam o alicerce para a construção do artefato do modelo abstrato do produto, representado na UML pelo diagrama de componentes.

Uma vez concebido o modelo concreto, com as definições conceituais necessárias, a fase de implementação migra para o modelo concreto do produto mecatrônico, com as definições tecnológicas adequadas para a construção de cada componente. O processo de definição da tecnologia é realizado com o auxílio da matriz morfológica para encontrar os princípios de soluções possíveis para cada um



dos componentes do modelo abstrato. Cada componente pode ter várias soluções possíveis. Nesse sentido, deve-se buscar representar todas elas na matriz morfológica.

A construção, que é a implementação física do modelo concreto, possibilita a integração dos diversos domínios do produto mecatrônico. Nessa fase, o protótipo do produto, formado pela composição de seus componentes, será submetido a validações, que resultarão no modelo do produto pronto para a fabricação.

A entrega é o modelo do produto com toda a documentação gerada para possibilitar a sua fabricação.

Essa abordagem bem detalhada na fase de projeto conceitual para o desenvolvimento do software, com a utilização dos diagramas de caso de uso, diagramas sequencial e diagramas de classe, apresenta dificuldades para a elaboração da lógica de controle, uma vez que esses diagramas não são facilmente entendidos pelos engenheiros de controle. Também o desdobramento da função global fica limitado aos componentes de software, não sendo explorados os componentes mecânicos. Embora as atividades funcionais, principalmente as relacionadas às interfaces entre a parte eletrônica e software, estejam muito bem detalhadas, a confiabilidade é tratada nos procedimentos de testes e validações, aplicados intensamente na implementação do modelo concreto, onde o nível de abstração é menor e já se tem formada a materialização do produto.

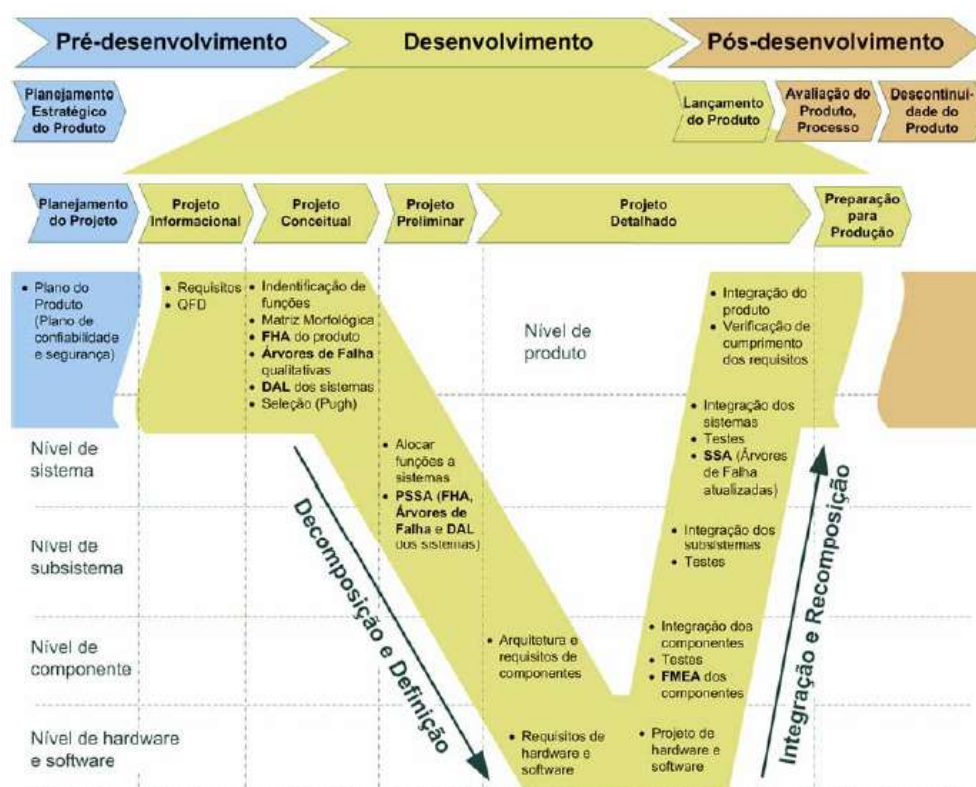
E é justamente essa lacuna, apresentada pela abordagem na fase de projeto conceitual, que este estudo pretende suprir, visando tornar a metodologia mais abrangente no projeto conceitual do produto mecatrônico. A abordagem aproveita o potencial dos recursos organizados no domínio do software, sem desconsiderar os demais domínios da mecatrônica, associando-os com os aspectos de confiabilidade.

#### 4.5 MÉTODO FREITAS

Freitas (2008) propôs um método de análise de confiabilidade e segurança no projeto de sistemas mecatrônicos altamente integrados e complexos, com base no que ele chamou de modelo V consensual de desenvolvimento de produtos (figura 21).

O método considera as macrofases de desenvolvimento, tais como, planejamento estratégico de produtos, e de desenvolvimento, que corresponde às fases de projeto informacional, conceitual, preliminar e detalhado. Define critérios para o desenvolvimento de cada item do produto e também critérios de aceitação de risco. Para isso, utiliza uma classificação da severidade da falha, combinada com a abordagem de Rigor de Garantia do Desenvolvimento DAL – *Development Assurance Level*, usado na indústria aeroespacial e adaptado pelo autor (quadro 11).

Figura 21 – Visão geral do modelo V.



Fonte: (FREITAS, 2008).

O DAL, para cada sistema ou subsistema, é determinado considerando a condição de falha mais severa, relacionada às funções que o sistema ou subsistema executam. O DAL implica em um processo de desenvolvimento com rigorismo adequado para minimizar erros capazes de afetar a segurança. No quadro 9, o DAL “A” apresenta-se mais rigoroso do que o DAL “E”, o que significa que, para

execução do DAL “A”, é necessário verificar o maior número de atividades e detalhes para garantir a confiabilidade e segurança do produto.

A metodologia apresentada por Freitas (2008), define, na fase de projeto conceitual, a função global do produto e sua decomposição em subfunções, utilizando o método da função síntese. Recorre-se a esse método devido à vantagem, clareza e possibilidade de segregação de Energia, Materiais, Sinais/Comandos em conjuntos separados, facilitando a identificação dos elementos ativos e passivos e o rastreamento do fluxo de sinais.

Quadro 11 – Proposta de atribuição de DAL para o setor automotivo

Efeito	Severidade do efeito	Índice	Nível de Garantia do Sistema (DAL)
Perigoso sem aviso	Índice de severidade muito alto quando um modo de falha potencial afeta a segurança de operação do sistema sem aviso.	10	A
Perigoso com aviso	Índice de severidade muito alto quando um modo de falha potencial afeta a segurança de operação do sistema com aviso.	9	
Muito alto	Sistema inoperante com falha destrutiva sem comprometer a segurança.	8	B
Alto	Sistema inoperante com dano ao equipamento.	7	
Moderado	Sistema inoperante com dano pequeno.	6	C
Baixo	Sistema inoperante, mas sem dano.	5	
Muito baixo	Sistema operante, mas com degradação de desempenho significativa.	4	D
Menor	Sistema operante com degradação média de desempenho.	3	
Muito menor	Sistema operante com interferência mínima.	2	
Nenhum	Sem efeito	1	E

Fonte: (FREITA, 2007).

Uma estrutura de funções é obtida pela decomposição da função global em funções de menor complexidade. Também é elaborada uma descrição de funcionamento em forma de procedimentos, no intuito de promover o entendimento da dinâmica do produto. Isso é importante em projeto de produtos mecatrônicos, sobretudo, porque antecipa as tarefas principais desejadas para o software e para o sistema de controle. O resultado dos métodos da função síntese e da descrição em forma de procedimentos são combinados, gerando uma lista das funções que precisam ser implementadas.

Para cada uma das alternativas de projeto, é elaborada a Análise de Risco Funcional (FHA). Cada condição de falha do FHA do produto é então avaliada pelo método Análise de Árvore de Falha (FTA). Para cada condição de falha, verifica-se quais são as possíveis causas, desdobrando até o nível de sistema ou subsistema.

Deve-se ainda analisar a necessidade de uso de redundâncias e técnicas de partição, de modo a abrandar o rigor necessário ao desenvolvimento (DAL) dos sistemas e subsistemas, dependendo da técnica de particionamento e da arquitetura do produto escolhida.

Com efeito, é possível comparar as alternativas de solução quanto à confiabilidade e segurança. Um critério para a escolha da melhor alternativa é a existência do menor número de condições de falha de índice de severidade “9” ou “10”. Havendo empate, o critério de desempate seria a existência do menor número de condições de falhas de severidade “7” e “8”, e assim por diante. Nesse sentido, em uma escala de “1” (inseguro) a “5” (mais seguro), por exemplo, a alternativa que se apresentar com o menor número de condições de falha de alta severidade receberá a nota 5, enquanto as outras receberão notas menores.

A metodologia proposta por Freitas (2008), embora abrangente, é focada na análise crítica de segurança do produto mecatrônico como um todo, dando ênfase à definição geral dos aspectos de segurança. Na fase de projeto conceitual, para a elaboração do software, o autor adotou os conceitos abordados na metodologia MdpM, já discutida anteriormente.

Além disso, o método Freitas é complexo na sua aplicação e, justamente por isso, demanda grande quantidade de tempo para obtenção de dados, assim como o envolvimento de uma equipe de projetistas de grande porte e especializada. O fato é que o referido método é mais indicado para produtos mecatrônicos altamente complexos, como o projeto de desenvolvimento de aeronaves ou automóveis. No caso dos produtos de pequeno porte, aqueles com menor complexidade, sua aplicação pode comprometer a análise da confiabilidade, sobretudo, na fase de projeto conceitual, uma vez que para esse tipo de produto não é viável disponibilizar uma grande equipe de projeto. Entretanto, a abordagem proposta utilizará os conceitos de desdobramento da função global para encontrar a arquitetura do produto.

O método proposto a seguir, objeto dessa pesquisa, consiste na utilização de uma linguagem simples e de fácil execução para elaboração do projeto conceitual de produtos mecatrônicos, abrangendo todos os domínios e possibilitando a compreensão de todos quanto aos conceitos selecionados. Estes, aliás, serão avaliados quanto à possibilidade de incidência de falhas funcionais em potencial, de

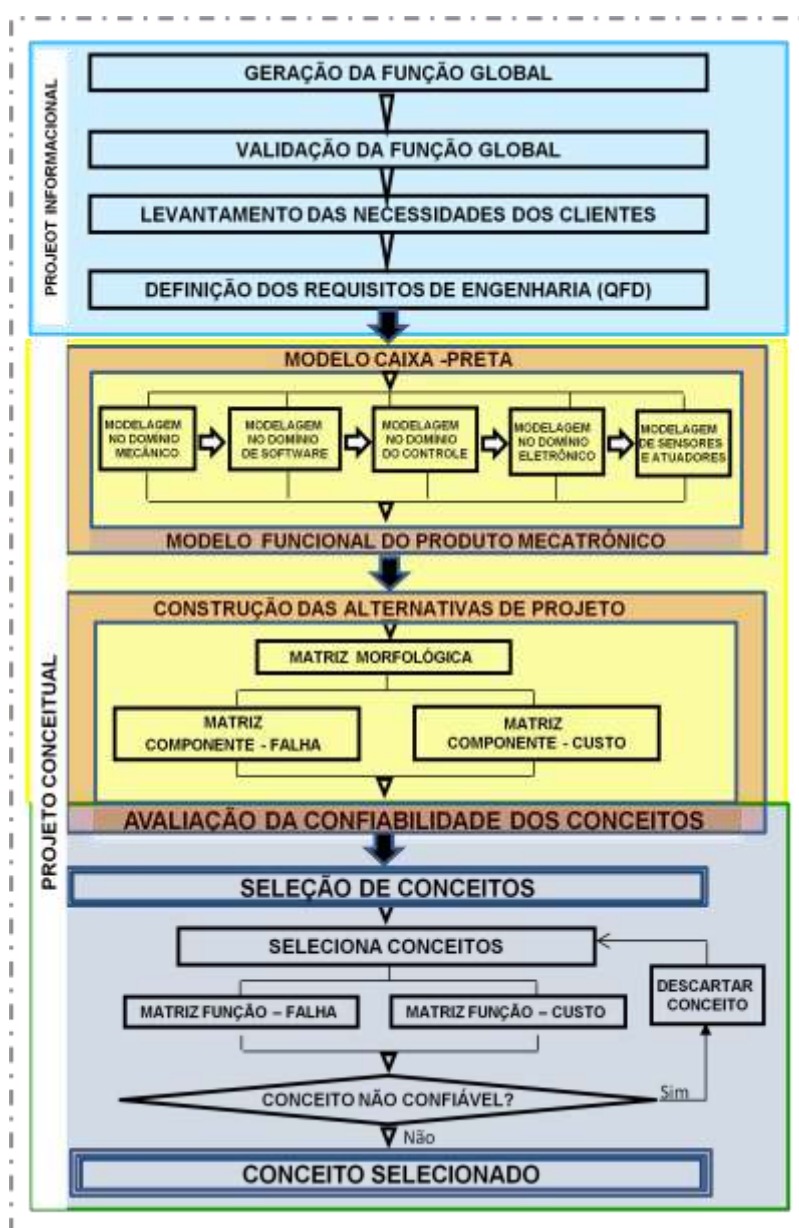
modo a evitar que conceitos não confiáveis passem para a fase seguinte de projeto detalhado.

No capítulo seguinte, é apresentado o método CPCPM – Confiabilidade no Projeto Conceitual de Produtos Mecatrônicos – para avaliar a confiabilidade, voltado para a elaboração do projeto conceitual de um produto mecatrônico novo ou para a melhoria de um produto existente, para aplicação generalizável.

## 5 O MÉTODO CPCPM

O método CPCPM – Confiabilidade no Projeto Conceitual de Produtos Mecatrônicos – (figura 22) propõe uma linguagem para elaboração do projeto conceitual de produtos mecatrônicos, abrangendo as particularidades do domínio mecânico, eletrônico, software e engenharia de controle, e promovendo a interação e integração dos conceitos com uma visão global do produto.

Figura 22 – O método CPCPM



Fonte: (SANTANA, 2011)

No método CPCPM é inserido o tratamento de questões de confiabilidade pela avaliação dos conceitos selecionados quanto à incidência de falhas funcionais em potencial, de modo a evitar que conceitos selecionados não confiáveis passem para a fase seguinte de projeto detalhado.

A principal característica do método é sua fácil compreensão e aplicação, que reduz o tempo gasto na elaboração do projeto conceitual e na avaliação dos aspectos de confiabilidade, motivando seu uso pelos projetistas. Estruturalmente, está dividido em três partes: a primeira diz respeito à elaboração da fase de projeto informacional e as seguintes dizem respeito ao projeto conceitual do produto mecatrônico: elaboração do modelo funcional e avaliação da confiabilidade dos conceitos selecionados.

No projeto informacional, é dada ênfase ao levantamento das necessidades dos clientes, que são os usuários do produto, as quais serão utilizadas na busca de inovações tecnológicas. O produto mecatrônico se tornará mais atrativo na medida em que apresentar um maior número de inovações tecnológicas.

No projeto conceitual, a atenção recai sobre a modelagem do produto mecatrônico nos diversos domínios da mecatrônica, incluindo a elaboração da lógica de controle, muito específica e diferente da modelagem convencional utilizada no desenvolvimento de software.

Na avaliação da confiabilidade, o método CPCPM mostra um caminho para avaliação dos conceitos selecionados no projeto conceitual, quanto à incidência de falhas, pela similaridade de componentes em nível funcional.

## 5.1 PROJETO INFORMACIONAL

O passo inicial consiste na geração da função global do produto mecatrônico, a qual é definida a partir da combinação do par verbo-objeto, que representa a ideia do produto. Existem funções secundárias ou complementares para representar o produto, porém, a função global é aquela que resume a ideia como um todo do produto mecatrônico.

Na validação da ideia de um produto mecatrônico para desenvolvimento, cinco fatores devem ser levados em consideração:

- a) *O contingente de pessoas que o produto irá beneficiar com a sua utilização:* este item revela a dimensão que o produto atingirá no mercado, sendo, portanto, fundamental para a definição do custo/benefício. Se o produto atende a um pequeno contingente de pessoas, provavelmente não trará uma contribuição significativa para a sociedade. Logo, seu custo/benefício será mínimo, a não ser que seu valor agregado seja muito alto;
- b) *O impacto que o produto trará ao Meio Ambiente:* consiste num item significativo, uma vez que a violação das regulamentações de proteção ambiental pode proporcionar elevadas penalidades, resultando, em muitos casos, na retirada do produto do mercado. Os requisitos ambientais devem ser levados em consideração desde o início do projeto, a partir da seleção da função global, ou seja, quanto mais cedo forem detectados os riscos ambientais na concepção do produto mecatrônico, mais capazes serão os projetistas de atender a demanda de mercado de maneira eficiente e sustentável;
- c) *A confiabilidade do produto:* é a garantia de que o produto funcionará satisfatoriamente ao longo do seu ciclo de vida, o que significa definir o que é considerado satisfatório para o uso que será dado ao produto;
- d) *O tempo necessário para colocar o produto no mercado desde o início do projeto:* pelo fato do produto mecatrônico estar, em geral, inserido em um mercado cuja velocidade de mudanças é alta, o tempo de desenvolvimento do produto deve ser o mais curto possível, a fim de evitar a sua prematura obsolescência;
- e) *O impacto do custo do produto para os usuários e para a sociedade:* para que o produto tenha êxito no mercado, é necessário que possua um preço de venda acessível. Encontrar soluções de projeto criativas, que propiciem uma significativa redução do custo, sem prejuízo da qualidade e da confiabilidade, é meta importante.

A validação da função global possibilita à equipe de projeto conhecer o potencial da ideia do produto mecatrônico e decidir pela continuidade ou não do seu projeto de desenvolvimento. Se a decisão for continuar, o passo seguinte é o



levantamento das necessidades dos clientes, com o objetivo de conhecer as particularidades que o produto mecatrônico deve possuir na visão das pessoas que, de alguma forma, irão com ele se envolver.

### **5.1.1 Levantamento das Necessidades dos Clientes (NC)**

Representa uma etapa muito importante no desenvolvimento de produtos novos e altamente tecnológicos, como é o caso de um produto mecatrônico, em que a inovação tecnológica é fundamental para o diferencial de sucesso no mercado.

O levantamento das necessidades dos clientes visa conhecer a percepção dos usuários do produto, ou seja, aquelas pessoas que, direta ou indiretamente, o utilizarão – fabricantes, profissionais de *marketing*, vendas e usuários.

Destaca-se aqui a tentativa de evitar a abordagem tradicional em que o projetista representa o principal e único fornecedor das ideias.

Quanto mais elaborado for o levantamento das necessidades dos clientes, mais evidentes serão os pontos importantes e funcionalidades que o produto mecatrônico deve oferecer e restrições a que será submetido.

Para extrair as informações dos clientes, usuários e especialistas envolvidos, o método CPCPM propõe a realização de entrevistas, as quais podem ser efetuadas em reuniões coletivas ou encontros individuais. Em ambos os casos – e, sobretudo, nas entrevistas individuais –, as informações extraídas deverão ser registradas, a fim de que possibilitem a construção de um quadro geral das necessidades consolidadas dos clientes.

Pontua-se que, nas entrevistas, não deve haver filtro das ideias emanadas dos clientes, ou seja, o descarte daquelas respostas que aparentemente não possuem relação com a pergunta realizada. E estas serão frequentes, uma vez que a pergunta constitui um catalisador que permite o afloramento das ansiedades na visão do entrevistado. É preciso ter cuidado na condução das entrevistas, pois, perguntas mal construídas poderão “engessar” o cliente. Além disso, o objetivo principal é ouvir tudo o que ele está pensando sem exercer nenhum senso crítico. Tudo deve ser registrado, a partir de diferentes recursos, para posterior consolidação.

Durante as entrevistas, deve ser definido o grau de importância de cada necessidade na visão do cliente. Propõe-se que essa definição se efetue por meio de determinados valores apresentados pelo método CPCPM (Quadro 12).

Quadro 12 – Grau de importância das necessidades dos clientes

DESCRIÇÃO	PESO
A necessidade é muito importante e sua falta irá comprometer o sucesso do produto mecatrônico.	5
A necessidade compromete em parte o sucesso do produto mecatrônico, mas é importante ter ela por ser um diferencial do produto mecatrônico que irá contribuir para o encantamento do Cliente.	Entre 4 e 2
A necessidade não compromete o sucesso do produto mecatrônico e é uma opção atendê-la, ou ela constitui uma atividade de apoio.	1

Fonte: (SANTANA, 2011)

Ao final das entrevistas, tem-se uma lista dos desejos dos clientes, acrescida do grau de importância que eles atribuíram a cada uma das necessidades. Essa lista deve ser consolidada para verificação de eventuais redundâncias que possam ter sido geradas nas entrevistas individuais, e também necessidades pouco relevantes para o projeto, as quais, devem ser eliminadas. Com isso, têm-se uma lista da representatividade dos desejos dos clientes.

As necessidades dos clientes representam a sua “voz” em uma linguagem de compreensão de quem vai utilizar o produto mecatrônico e nem sempre define ou direciona parâmetros de engenharia. É importante transformar os desejos dos clientes em uma linguagem técnica de engenharia, que possibilite a sua compreensão pelos engenheiros projetistas para desenvolvimento do produto.

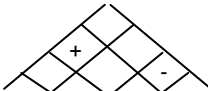
Os requisitos de engenharia ou requisitos técnicos do produto vão nortear e facilitar o desenvolvimento do produto pela utilização de uma linguagem técnica de engenharia, eliminando ambiguidades ou termos vagos que apareceram na lista anterior.

### 5.1.2 Definição dos Requisitos Técnicos do Produto

Para o levantamento dos requisitos técnicos do produto, podem ser utilizadas diferentes ferramentas, tais como: *brainstorming*, *check-list* e informações de outros projetos similares. Também deve ser dada atenção especial para o atendimento aos requisitos definidos nas normas que regulamentam o uso do Meio Ambiente em que o produto será inserido, uma vez que o não atendimento a esses requisitos poderá comprometer o sucesso do produto desenvolvido, ou ainda torná-lo inviável.

Uma vez definidos os requisitos técnicos do produto, é necessário associá-los às necessidades dos clientes, com o objetivo de alinhar o desenvolvimento do produto aos desejos desse grupo específico. O método matriz Casa da Qualidade (QFD) é usado com esse propósito (figura 23).

Figura 23 – Exemplo da matriz casa da qualidade (QFD)

Requisitos Técnicos do Produto					
	Grau de importância	Requisito Técnico 1	Requisito Técnico 2	Requisito Técnico 3	Requisito Técnico 4
Necessidades dos Clientes					
Necessidade 1	1	5		1	
Necessidade 2	2		5		3
Necessidade 3	3		1	5	
Necessidade 4	4	3			3
Índice de Importância Técnica		17	13	16	18
Classificação do requisito		2º	4º	3º	1º

Fonte: (SANTANA, 2011)

Para quantificar o fator de relacionamento entre cada necessidade dos clientes e o correspondente requisito técnico do produto, o método CPCPM adota os valores indicados no quadro 13. Se um requisito tem um relacionamento forte com uma necessidade, é atribuído o valor “5” no cruzamento entre a linha e a coluna a eles correspondentes. Caso ele possua um relacionamento fraco, atribui-se o valor “1”.

Quadro 13 – Fator de relacionamento

RELACIONAMENTO	Grau
Relacionamento forte	5
Relacionameto médio	3
Relacionamento fraco	1

Fonte: (MASCARENHAS, 2007)

Na penúltima linha da matriz Casa da Qualidade (QFD), registra-se o Índice de Importância Técnica (IIT) de cada requisito técnico do produto. Quanto maior for o IIT, maior será a contribuição desse requisito para o atendimento das necessidades dos clientes. O IIT prioriza o desenvolvimento do projeto daqui em diante.

O IIT é obtido pelo somatório da multiplicação do grau de importância de cada necessidade do cliente pelo fator de relacionamento. No exemplo (figura 24), o requisito técnico do produto com maior IIT é o **Requisito Técnico 4**, enquanto o menor é o **Requisito Técnico 2**. No desenvolvimento do produto, deve ser dada maior atenção ao **Requisito Técnico 4** em relação ao **Requisito Técnico 2**, uma vez que sua contribuição é maior para o atendimento das necessidades dos clientes. Na última linha, os requisitos do produto são classificados em ordem decrescente do valor do IIT.

As interações entre os requisitos técnicos do produto formam o “telhado” da matriz casa da qualidade, ao mesmo tempo em que proporcionam a análise dos possíveis efeitos e intensidades entre eles. O sinal positivo indica que o atendimento do requisito beneficia o requisito correspondente e vice-versa, enquanto o sinal negativo indica que o atendimento do requisito prejudica o outro, ou seja, é gerado um conflito que tem de ser balanceado ao longo do desenvolvimento.

Os requisitos técnicos do produto, em conformidade com as necessidades dos clientes, irão nortear o desenvolvimento do produto mecatrônico na fase seguinte de projeto conceitual, onde se buscam os princípios de soluções para atendimento desses requisitos.

## 5.2 PROJETO CONCEITUAL

O projeto conceitual é caracterizado por um nível de abstração elevado em busca da criação, representação e seleção de soluções para o problema de projeto. Abstração é um processo mental que consiste em isolar aspectos determinantes de um estado de coisas relativamente complexo, a fim de simplificar a sua avaliação

A modelagem do produto é executada para obtenção do modelo funcional. Nessa fase, o produto passa a ser conhecido pela sua funcionalidade, ou seja, as funções necessárias para atendimento à função global, que é a função principal do produto, aquela que possui maior representatividade da sua existência.

O modelo funcional é uma descrição detalhada do produto em funções elementares necessárias para alcançar a função global. O objetivo é encontrar as subfunções que operam o fluxo desde a entrada até a saída do modelo caixa-preta (figura 24), em termos de fluxos de energia, material e sinal.

### 5.2.1 Modelo Caixa - Preta

Identificam-se, entre os requisitos técnicos do produto, aqueles que de alguma forma, dizem respeito às funções do produto. Estes são relacionados em ordem decrescente do IIT na entrada do modelo caixa-preta, identificando o fluxo mais representativo do requisito.

Figura 24 – Modelo caixa - preta



Fonte; (SANTANA, 2011)

O produto mecatrônico constitui uma coleção de subsistemas interconectados com várias dependências de projeto que cruzam as fronteiras entre os domínios da mecânica, eletrônica, software e sistema de controle. Cada domínio tem suas especificidades e utiliza normas e conceitos próprios para a modelagem do produto, propiciando a criação de modelos individuais que nem sempre são compreendidos por todos os envolvidos, quebrando a sinergia necessária para o desenvolvimento do produto.

Normalmente, no domínio mecânico, a modelagem funcional é desenvolvida a partir da identificação da estrutura de funções ou árvore funcional. Essa estrutura descreve um relacionamento do sistema técnico e físico do problema de projeto por meio de fluxos de energia, materiais e sinais.

No domínio de software, a elaboração do modelo segue, normalmente, os princípios da Orientação a Objetos (O-O), atualmente sistematizada pela linguagem UML.

Ferramentas modernas de projeto e programação em ambientes industriais, como a norma IEC-61131 e IEC-61499, têm apoiado os engenheiros de controle na modelagem do produto, com características orientadas ao encapsulamento e reutilização dos módulos de software. As estruturas são baseadas em unidades organizacionais do programa, destacando-se os Blocos de Funções – *Functions Blocks (FB)*.

O método proposto – CPCPM – descreve uma sequência para elaboração do modelo funcional, permeando todos os domínios da mecatrônica. Devido à sua complexidade, a elaboração desse modelo exige que sejam entendidas as peculiaridades da modelagem em cada domínio específico da mecatrônica, os quais são conceitualmente detalhados a seguir e complementado pelo apêndice A. No capítulo seguinte o CPCPM poderá ser melhor avaliado a partir de um estudo de caso.

#### 5.2.1.1 Modelagem no Domínio Mecânico

O conjunto mecânico é constituído de partes fixas que correspondem à estrutura física responsável pela sustentação do produto mecatrônico, capaz de suportar as tensões ocasionadas pelos esforços às quais este se encontra sujeito.

Também existem partes móveis, que desenvolvem movimentos lineares, angulares ou uma combinação de ambos, gerando trajetórias espaciais.

A definição da trajetória do movimento do produto é uma das primeiras decisões no projeto conceitual, uma vez que afeta os outros aspectos do produto mecatrônico. O tipo de sistema de movimento, o dimensionamento da transmissão e a colocação de sensores têm influência direta no seu desempenho.

A ocorrência desses movimentos em uma trajetória definida ou projetada acontece pelas ligações dessas partes móveis com as partes fixas. Para isso, são utilizados normalmente guias para direcionar o movimento translacional ou movimento linear das partes móveis. São usados ainda mancais para manter o movimento angular em torno de um eixo imaginário, que é o centro de rotação das partes móveis.

Essas guias e mancais, quando não adequadamente selecionadas, podem provocar esforços adicionais não previstos no projeto, gerando um aumento do torque necessário para a sua movimentação, o que tende a comprometer o desempenho dos atuadores e, por conseguinte, o produto mecatrônico como um todo.

A modelagem inicia pela construção da árvore funcional, considerando as trajetórias dos movimentos a partir do desdobramento da função global. Ela é utilizada, principalmente, para identificar as principais funções no domínio mecânico. Um descritivo da abstração do objeto de projeto definido pela função global ajuda a refletir a operação intelectual do problema, isolado de fatores que comumente lhe estão relacionados na realidade. Esse descritivo ajuda na identificação das funções principais.

Para as subfunções que vão interagir com o sistema mecatrônico são elaborados os casos de uso, que mostram conceitualmente o conjunto de funções que o sistema mecatrônico deve executar para atender às necessidades dos clientes. Por exemplo, as necessidades de sensores e atuadores começam a ser reveladas para a construção do modelo funcional.

Os casos de uso permitem conhecer a funcionalidade do produto mecatrônico, bem como propicia uma ligação com a modelagem no domínio de software, uma vez que os casos de uso servem de base para o desenvolvimento conceitual do software, como definido na linguagem UML. Após a construção da

árvore funcional e elaboração dos casos de uso, um diagrama simplificado do produto mecatrônico é elaborado para mostrar a ideia revelada e facilitar a compreensão de todos os envolvidos.

### 5.2.1.2 Modelagem no Domínio do Software

A UML, que é uma linguagem gráfica para análise, especificação e construção de sistemas para representar projetos O-O – Orientação a Objeto – utilizando uma notação comum, é empregada para a modelagem no domínio do software. A partir dos casos de uso elaborados anteriormente, é construído o diagrama de casos de uso que representa o comportamento que o sistema mecatrônico executa em colaboração com um ou mais atores, sem necessidade de revelar a sua estrutura interna.

O diagrama de casos de uso mostra a sua relação com os atores, mas não revela o fluxo de eventos que ocorre por meio deles. Isso é suplementado pelo diagrama de interação, que permite fazer a análise de realização, revelando como o **Sistema** deve implementar as ações, focalizando os objetos que devem ser criados para implementar a funcionalidade requerida nos casos de uso. Eles facilitam na determinação das classes que irão compor o diagrama de classes, o qual representa a estrutura estática do modelo.

Um objeto mecatrônico é composto de um agregado de partes mecânicas, sensores, atuadores e rotinas de software de controle, especialmente relacionadas a uma dada parte do sistema. Na elaboração do diagrama de classes para a modelagem mecatrônica, utilizam-se os elementos estereotipados da UML para representar os objetos mecatrônicos (BONFÉ, FANTUZZI, 2003a).

Considerando que o objeto mecatrônico deve ter uma interface baseada em sinal, adequada para receber e enviar informações, a parte de software desse objeto pode ser um módulo reutilizável do programa de controle que é modelado como uma classe <<mecatrônica>> que está sujeita as seguintes regras:

- a) Atributos estereotipados como <<entrada>> são públicos, mas os seus valores deve ser modificados exclusivamente do lado de fora da classe.



Eles representam a interface de dados e sinal da classe, relacionados à interação com outros componentes do software;

- b) Atributos estereotipados como <<saída>> são também públicos, mas, seus valores devem ser modificados exclusivamente pelo comportamento interno da classe;
- c) Todos os outros atributos da classe devem ser privados;
- d) Operações que podem ser usadas para modelar atividades de processamento interno não podem ter visibilidade pública.

A parte da classe <<mecatrônica>> relacionada às conexões física de E/S deve ser mapeada em uma parte privada do objeto mecatrônico, definida com a ajuda da classe estereotipada <<hardware>>. Portanto, essa classe é ligada à classe <<mecatrônica>> através de uma agregação forte ou composição, na terminologia da O-O. Atributos da classe <<hardware>> representam as portas de E/S do objeto mecatrônico (BONFÉ, FANTUZZI, 2003a).

Nesse nível de desenvolvimento é possível que novas necessidades de casos de uso sejam criadas e/ou revisadas, fazendo com que o processo seja retornado ao início para refinamento do modelo em desenvolvimento. Como o projeto é mecatrônico, a árvore funcional, se necessário, deve ser revisada com a inclusão das novas funções reveladas.

### 5.2.1.3 Modelagem no Domínio do Controle

No diagrama de classes, os objetos foram analisados sob o ponto de vista do conjunto, ou seja, cada objeto interagindo ou comunicando-se uns com os outros. No entanto, não foi analisado o que acontece internamente em cada objeto durante o tempo de execução, ou seja, como um objeto se comporta – age e responde – quando recebe eventos (estímulos).

A análise do comportamento de um objeto e, por conseguinte, da ordem em que as operações são executadas é importante para a compreensão e entendimento do modelo dinâmico do sistema mecatrônico.

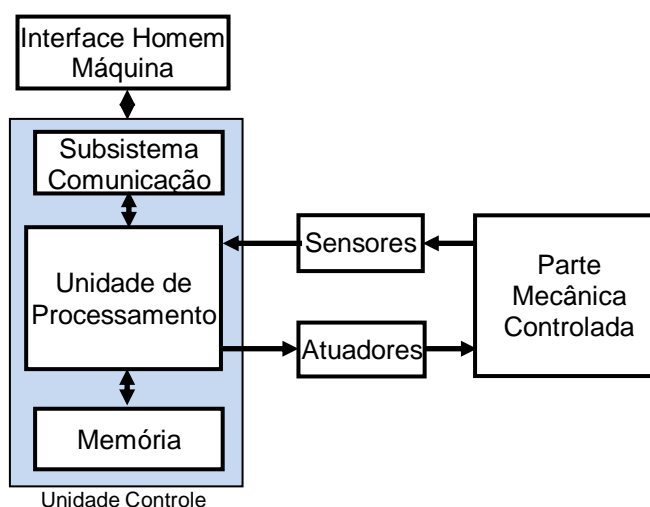
Para o estudo do comportamento das classes de objeto, o método CPCPM recomenda a elaboração dos diagramas de estado, denominado *statechart*, que permitem a análise de todos os estados possíveis de cada objeto e, de modo mais abrangente, de todo o sistema modelado. Ele complementa a descrição das classes de um modelo, uma vez que permite visualizar a sequência de estados pelos quais um objeto passa durante seu ciclo de vida e os eventos ou estímulos do ambiente que provocaram essas mudanças (BONFÉ, FANTUZZI, 2003b)..

Os *statecharts* mostram o comportamento dinâmico do sistema mecatrônico, facilitando a construção dos Blocos de Funções (FB). Estes constituem um mecanismo de abstração que permite que algoritmos industriais sejam encapsulados em uma forma facilmente compreendida e aplicada por engenheiros de controle, os quais não são especialistas na implementação de algoritmos complexos (TRANORIS, THAMBOULIDIS, 2003).

#### 5.2.1.4 Modelagem no Domínio Eletrônico

A modelagem no domínio eletrônico passa pela integração do hardware necessário à execução das funções de controle através do software. O desempenho do hardware (figura 25) tem influência direta na funcionalidade do software e ambos contribuem para que as ações de controle do produto mecatrônico atinjam o objetivo esperado.

Figura 25 – O hardware do produto mecatrônico



Fonte: (SANTANA, 2011)

A seleção de um controlador apropriado, com o apoio de um software correto não só é capaz de aumentar a capacidade do produto mecatrônico como também poder reduzir o tempo de projeto, auxiliando na reutilização do trabalho realizado nas diferentes etapas, eliminando a necessidade de revisões nas estratégias de controle. Justamente por isso, decisões hardware e software devem acontecer em uma sinergia entre ambos na fase de projeto conceitual.

O hardware é composto da Unidade Central de Processamento (CPU), memória e *link* de comunicação de dados. No caso de um produto mecatrônico, é complementado pelos sensores e atuadores que constituem o *link* de comunicação entre as partes mecânicas e a unidade de controle. Normalmente, são utilizados quatro grupos de hardware para o sistema de controle: CLPs, CNCs, PCs e hardware personalizado.

#### 5.2.1.5 Modelagem de Sensores e Atuadores

Finalmente, a modelagem dos sensores passa pela localização mais adequada que devem ser posicionados para fornecer todas as informações necessárias ao processamento. Sua localização vai determinar o tempo morto do processamento e isso interferirá no sistema de controle. A base do sistema de controle são as informações oriundas dos sensores. Se forem geradas informações errôneas, todo o sistema de controle do produto mecatrônico pode ficar comprometido. Faixa de medição e precisão são atributos necessários na especificação dos sensores.

Do mesmo modo, atenção especial deve ser dada aos atuadores que são responsáveis por converter energia elétrica em energia mecânica. Eles são usados para produzir movimento ou ação, tais como movimento linear ou movimento angular. A modelagem dos atuadores passa pela escolha mais adequada para atender aos requisitos de torque que os mesmos devem fornecer para a movimentação das partes móveis na velocidade requerida. Considerações sobre os efeitos das transmissões dos movimentos devem ser apreciadas, uma vez que as forças de atritos ocasionadas por elas podem comprometer o seu desempenho.

A construção do modelo funcional no método CPCPM proposto propicia uma visão uniforme nos principais domínios da mecatrônica, possibilitando que todos os

envolvidos possam, dentro desse nível de abstração, conhecer particularidades de cada domínio, favorecendo a sinergia do processo de desenvolvimento.

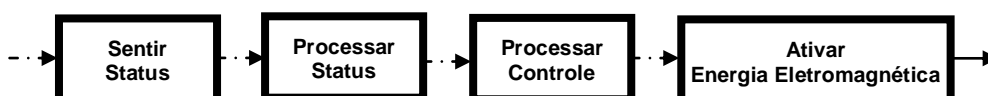
### 5.2.2 Modelo Funcional do Produto Mecatrônico

O modelo funcional do produto mecatrônico reúne todas as subfunções necessárias para operar os fluxos de material, energia e sinal, desde a entrada até a saída do produto, em conformidade com os requisitos de engenharia. Uma subfunção é formada de um par verbo – objeto, em que o verbo representa a função e o objeto o fluxo.

Manter uma uniformidade do nome da função e fluxo na elaboração do modelo funcional é muito importante para disseminar o conhecimento entre todos os envolvidos e evitar ambiguidades. O CPCPM propõe a utilização de uma linguagem padronizada para o desenvolvimento do modelo funcional. Essa linguagem é a Base Funcional, composta de um conjunto de funções e fluxos que são utilizados para formar uma subfunção. No apêndice B estão relacionados todos os fluxos e funções que compõem a base funcional.

A expressão do modelo na base funcional fornece, como benefício, estruturas repetíveis de funções e mantém uma uniformidade nos conceitos desenvolvidos, importante no projeto de um produto mecatrônico, justamente porque facilita o entendimento entre os diferentes domínios: mecânico, eletrônico, software e controle. Por exemplo, quando o fluxo de sinal é enviado de um sensor para o controlador e, após o processamento, este envia um sinal para o atuador, sua representação na base funcional (figura 26), evita que esse fluxo tenha diferentes formas de apresentação, a depender de quem o estar elaborando.

Figura 26 – Exemplo de fluxo na base funcional



Fonte: (SANTANA, 2011)

Nesse caso, sentir e processar são funções secundárias de sinal, e ativar é uma função secundária da magnitude de controle, conforme definido na base funcional, apêndice B.

O modelo funcional é criado a partir do modelo caixa-preta para atendimento aos requisitos técnicos do produto, com base nas informações geradas ao longo da modelagem em cada domínio, tornando uma linguagem compreensível em todos os domínios da mecatrônica. Isso possibilita que mudanças acontecidas em um domínio possam ser compreendidas pelos demais domínios, proporcionando uma sinergia no desenvolvimento do projeto mecatrônico.

A sinergia é conseguida pela forma proposta de elaboração do modelo funcional, iniciada pela construção da árvore funcional, típica do domínio mecânico, seguida pela descrição dos casos de uso das funções que interagem com o produto mecatrônico, a qual é a base para a elaboração dos diagramas UML linguagem dominante no desenvolvimento de software. O diagrama de classe e gráficos de estado (*Statecharts*) permitem a identificação dos Blocos de Funções (FB), que é a linguagem utilizada pela engenharia de controle. A informação gerada nos passos anteriores definem o modelo no domínio eletrônico. Em síntese, o modelo proposto é um modelo híbrido que facilita a compreensão em multidomínios.

Uma vez elaborado o modelo funcional, é realizada uma seleção das subfunções que são essenciais para o produto, que vão ser utilizadas para a construção das alternativas de projeto e avaliação da confiabilidade. A relação de subfunções eleitas não deve ser muito extensa, o ideal é até dez subfunções e, preferencialmente, abranger os fluxos de material, energia e sinal.

### **5.2.3 Construção das Alternativas de Projeto**

Para a construção das alternativas de projeto, a partir do modelo funcional são selecionadas aquelas subfunções que têm maior impacto no produto mecatrônico em conformidade com as necessidades dos clientes. Normalmente, selecionam-se dez subfunções para elaboração dos “princípios de solução”.

Para cada subfunção são levantadas as alternativas de soluções, que possibilitam selecionar os “princípios de solução” individual do produto, ou seja, encontrar os Sistemas, Subsistemas, Componentes (SSCs) que atendam a

operacionalização da subfunção . Quanto mais alternativas são ofertadas para cada subfunção, maiores serão as possibilidades de se encontrar soluções para a construção da arquitetura do produto. Essa arquitetura é obtida de diferentes combinações individuais que formarão os “princípios de solução” total.

A matriz morfológica é construída para fornecer uma sistematização na geração de alternativas de solução para atendimento ao modelo funcional em busca de soluções mais criativas e eficientes para o produto mecatrônico.

No CPCPM, as linhas da matriz morfológica (figura 27) correspondem às subfunções do modelo funcional, enquanto as colunas representam os componentes (SSCs) que podem ser selecionados para atender a essas subfunções. Se um dado componente executa uma dada subfunção, é colocado na célula correspondente o valor “1”. Caso contrário, a célula fica em branco.

Figura 27 – Exemplo geral da matriz morfológica

	Componente_1	Componente_2	Componente_3	Componente_4	Componente_5
Subfunção_1	1	1		1	
Subfunção_2		1		1	1
Subfunção_3		1	1		1

Fonte: (SANTANA, 2011)

A medida que novos produtos são desenvolvidos, novos modelos funcionais são elaborados e, conseqüentemente, novas subfunções são identificadas. Essas novas subfunções podem ser acrescentadas à matriz morfológica (figura 27), permitindo a inserção de novos SSCs ou aproveitamento dos existentes. Isso propicia a formação de um banco de dados de repositório de projeto, que visa facilitar a elaboração da matriz morfológica e também aumentar as alternativas de projeto, ganhando com isso, qualidade e tempo no desenvolvimento do projeto conceitual.

Elaborada a matriz morfológica, o passo seguinte é selecionar os conceitos que podem formar os “princípios de solução” total, ou seja, os SSCs que irão formar

a arquitetura do produto. O CPCPM propõe uma sistematização para avaliar a confiabilidade dos conceitos selecionados. O objetivo é proporcionar a eliminação de conceitos não confiáveis já nessa fase de projeto conceitual, com o objetivo de aumentar a eficiência da função global.

### 5.3 AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE NO PROJETO CONCEITUAL

Para a avaliação da confiabilidade dos conceitos selecionados o CPCPM sugere inicialmente a verificação da incidência de falhas nos conceitos. O interesse final é que sejam encontrados, entre os conceitos selecionados, aqueles que apresentam menor incidência de modos de falhas, descartando os demais, por serem considerados conceitos não confiáveis. Também, é possível considerar, na avaliação da confiabilidade, o Número Prioridade (NP), que leva em consideração os fatores de severidade (S), frequência de falha (F) e detectabilidade (D), o que torna mais detalhada a análise de confiabilidade pela consideração dos efeitos e consequências das falhas. Entretanto, isso torna o processo mais demorado, o que pode converter-se em desestímulo à avaliação da confiabilidade no projeto conceitual.

#### 5.3.1 Matriz Componente - Falha

Para cada componente (SSCs) identificado na matriz morfológica, são levantados os modos de falhas funcionais em potencial que os SSCs podem ser submetidos ao longo da sua vida útil. Tais falhas funcionais podem ser obtidas por meio da similaridade de componentes existentes que já as experimentaram e também por uma análise criteriosa do projetista, com larga experiência, auxiliada pelos modos de falhas relatados no Capítulo 2. Além disso, as informações de modos de falhas podem ser extraídas do *Repository Design (DESIGN ENGINEERING LAB)*, que é um laboratório de desenvolvimento de metodologia na área de projeto, do *Reliability Prediction of Electronic Equipment (DoD, 1995)*, do *Reliability Maintainability and Risk (SMITH, 2005)* e *Fundamentals and Applications (DHILLON, 1999)*. No apêndice A, constam informações detalhadas da modelagem nos domínios da mecatrônica, para conhecimento e entendimento não só da

construção dos modelos, mas também na identificação dos modos de falhas funcionais em potencial.

Uma vez identificados os modos de falhas de cada componente da matriz morfológica, é construída a matriz componente – falha (figura 28) que relaciona os modos de falhas de cada componente. As linhas dessa matriz são formadas pelos componentes identificados anteriormente na matriz morfológica, enquanto as colunas pelos modos de falhas funcionais em potencial identificados. Se um dado componente está propenso a ser submetido a uma determinada falha funcional em potencial, é colocado na célula correspondente o valor “1”. Caso contrário, a célula é deixada em branco.

Figura 28 – Matriz componente - falha

	Modo falha_1	Modo falha_2	Modo falha_3	Modo falha_4	Modo falha_5	Modo falha_6	Modo falha_8
Componente_1	1		1			1	
Componente_2	1						1
Componente_3				1	1	1	
Componente_4		1					
Componente_5		1		1		1	1

Fonte: (SANTANA, 2011)

Na medida em que novos componentes são adicionados à matriz morfológica, novos modos de falhas são identificados e inseridos na matriz componente – falha, formando um banco de dados que possibilitará, de forma rápida e fácil, a seleção de alternativas de soluções para a construção da arquitetura do produto mecatrônico.

### 5.3.2 Matriz Componente – Custo

A matriz componente – custo ( figura 29) é uma matriz de duas colunas: na primeira, são relacionados todos os componentes da matriz morfológica, enquanto



na segunda, é inserida a estimativa de preço de cada componente. A estimativa de preço pode ser obtida consultando fabricantes via internet, por telefone ou via email.

Figura 29 - Exemplo de matriz componente – custo

COMPONENTE	VALOR (R\$)
Componente_1	650
Componente_2	1100
Componente_3	2500
Componente_4	300
Componente_5	200

Fonte: (SANTANA, 2011)

### 5.3.3 Seleção de Conceitos

O conceito selecionado resulta da combinação de componentes para o atendimento das subfunções do modelo funcional. Para cada subfunção, são escolhidos, entre os grupos de componentes disponíveis, aqueles que vão atender suas operações de material, energia e sinal. Na matriz morfológica (figura 27) pode ser observado que em cada subfunção, os componentes disponíveis estão assinalados em cinza, enquanto os demais estão em branco. Os componentes escolhidos são demarcados com “1”, enquanto os demais permanecem vazios.

Os componentes selecionados na matriz morfológica, entre os disponíveis, para todas as subfunções do modelo funcional formam um conceito do produto mecatrônico. Por exemplo, a partir da matriz morfológica, vamos considerar que foi selecionado o conceito\_1, conforme ilustra a figura 30. Entre os componentes disponíveis, assinalados em cinza para a subfunção\_1, foi escolhido o componente\_1, representado com o valor “1” no cruzamento correspondente, enquanto o componente\_2 e o componente\_4 foram deixados em branco, significando que eles não foram escolhidos para representar essa subfunção\_1 na

seleção do conceito\_1. Nesse mesmo raciocínio foram identificados os componentes escolhidos para representar as demais subfunções.

Figura 30 – Matriz morfológica do **conceito\_1** selecionado

	Componente1	Componente2	Componente3	Componente4	Componente5
Subfunção 1	1				
Subfunção 2		1		1	
Subfunção 3			1		1

Fonte: (SANTANA, 2011)

Para encontrar a incidência de falhas funcionais em potencial do **conceito\_1** basta multiplicar essa matriz pela matriz componente – falha, ou seja:

$$\text{Matriz Função - Falha} = \text{Matriz Morfológica} \times \text{Matriz Componente - Falha}$$

O resultado dessa operação é uma matriz Função – Falha (figura 31) que relaciona para cada subfunção do modelo funcional as falhas funcionais em potencial que o produto mecatrônico pode vir a ser submetido, caso esse **conceito\_1** seja selecionado para a continuação do processo de projeto.

Figura 31 – Matriz função - falha do **conceito\_1**

MATRIZ FUNÇÃO - FALHA CONCEITO 1									
	Modo falha 1	Modo falha 2	Modo falha 3	Modo falha 4	Modo falha 5	Modo falha 6	Modo falha 8	Total de Falhas	Custo
Subfunção 1	1	0	1	0	0	1	0	3	850
Subfunção 2	1	1	0	0	0	0	1	3	850
Subfunção 3	0	1	0	2	1	2	1	7	1050
								<b>13</b>	<b>2750</b>

Fonte: (SANTANA, 2011)

O CPCPM utiliza, para a multiplicação de matrizes, o software Matlab. As matrizes em planilhas Excel (Microsoft) são exportadas para o Matlab, onde são realizadas as multiplicações, e os resultados são importados para planilhas em Excel. No exemplo acima, utilizando o Matlab, foi realizada a multiplicação da matriz morfológica do **conceito\_1** (figura 30) pela matriz componente – falha (figura 28). O resultado obtido no Matlab foi importado para uma planilha em Excel formando a matriz Função – Falha do conceito\_1 (figura 31). Como pode ser observado o conceito\_1 selecionado apresentou treze falhas funcionais em potencial. A multiplicação pela matriz componente – custo forneceu a estimativa de custo do **conceito\_1** selecionado, que nesse caso, foi de R\$ 2750,00.

Retornando à matriz morfológica, do mesmo modo, novos conceitos foram selecionados e identificadas as falhas funcionais em potencial. É oportuno ressaltar mais uma vez que, a formação do banco de dados de repositório de projeto, propiciará a geração de uma grande quantidade de conceitos, que podem ser avaliados quanto à incidência de falhas funcionais, tornando o processo mais criativo e seletivo. No exemplo anterior, além do **conceito\_1**, foram selecionados mais dois conceitos para avaliar o método proposto. O resultado encontra-se resumido na figura 32.

Figura 32 – Resumo dos conceitos selecionados

	Conceito 1		Conceito 2		Conceito 3	
	Falhas	Custo	Falhas	Custo	Falhas	Custo
Subfunção 1	3	850	3	850	5	1500
Subfunção 2	3	850	4	750	1	200
Subfunção 3	7	1050	5	950	5	950
Total do produto	<b>13</b>	2750	<b>12</b>	2550	<b>11</b>	2650

Fonte: (SANTANA, 2011)

Avaliando os três conceitos quanto à confiabilidade, o método evidenciou que o **conceito\_1** é o que apresenta maior incidência de falhas funcionais em potencial. Isso significa que ele é um conceito não confiável, comparado com os outros dois, e, portanto, deve ser descartado.

Os conceitos eleitos devem ser avaliados quanto ao impacto de cada um na confiabilidade do produto mecatrônico, considerando as interações com o ambiente

em que ele está inserido e também as interações humanas. Essas interações são normalmente ocultas ou latentes em todo o processo, mas contribuem fortemente para aflorar os modos de falhas.

A avaliação deve priorizar, em primeiro lugar, as subfunções que têm maior impacto nas necessidades do cliente e que, por consequência, irão impactar fortemente no desempenho da função global do produto.

As falhas funcionais em potencial avaliadas devem ser registradas e comentadas, com o objetivo de direcionar os esforços no projeto detalhado para minimizar seus efeitos.

Para avaliar a confiabilidade levando em consideração a severidade, detectabilidade e frequência de falhas, basta calcular o NP – Número Prioridade – de cada modo de falha e inserir o seu valor na matriz Componente – Falha, na célula correspondente. Seguindo o mesmo procedimento anterior, o resultado obtido será o *NP* do produto mecatrônico. Os conceitos que apresentarem maior valor de *NP* são considerados conceitos não confiáveis. No apêndice C estão inseridos os valores de severidade, detectabilidade e frequência de falha que permitem encontrar o número prioridade.

No capítulo seguinte é detalhado o estudo de caso utilizado na aplicação do método CPCPM, comprovando sua viabilidade no desenvolvimento do projeto conceitual de um produto mecatrônico com avaliação da confiabilidade. Generalizando, pode ser concluído que o método também pode ser aplicado a qualquer produto mecatrônico.

## 6 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso escolhido para avaliação da aplicabilidade do método CPCPM é o projeto de um dispositivo mecatrônico para transferência do paciente da cama-leito para a maca em hospitais, com o objetivo de transportá-lo pelos corredores até a sala de cirurgia ou outras dependências.

O processo habitual de transferência do paciente da cama-leito para a maca acontece com o envolvimento de, no mínimo, quatro auxiliares de enfermagem, que puxam o lençol que está sob o paciente, suspendendo-o e deslocando o conjunto lençol-paciente da cama-leito para a maca e vice-versa. Trata-se de um processo muito doloroso para o paciente e que, por vezes, traz também graves problemas para os auxiliares de enfermagem envolvidos, em função da péssima ergonomia do método.

A principal motivação para o desenvolvimento desse produto é a possibilidade de oferecer um maior conforto ao paciente e, ao mesmo tempo, preservar a saúde dos auxiliares de enfermagem, durante a execução do processo de transferência.

### 6.1 PROJETO INFORMACIONAL

A função global do produto mecatrônico com base no estudo de caso escolhido é “TRANSFERIR PACIENTE DA CAMA-LEITO PARA A MACA”.

O CPCPM define que a função global do produto mecatrônico a ser desenvolvida deve ser avaliada segundo os cinco fatores de validação da ideia:

- a) Esse dispositivo para transferência de paciente deve beneficiar o universo de enfermos em leitos de hospitais;
- b) Esse dispositivo não deve causar impacto considerável ao Meio Ambiente. A concepção da ideia mostra que existe a possibilidade de não uso de agressores ambientais no projeto;
- c) O produto deve ter uma alta confiabilidade, uma vez que a sua utilização envolve pessoas em um estágio frágil de saúde. Portanto, não podem ocorrer falhas de funcionamento;

- d) O tempo para desenvolvimento e colocação do dispositivo no mercado é baixo. Aparentemente, o produto proposto é pouco complexo, o que deve demandar uma pequena quantidade de tempo para o seu desenvolvimento. Além disso, é um produto inovador inexistente no mercado pesquisado;
- e) O custo esperado para esse produto deve ser baixo, considerando também os benefícios advindos da redução dos auxiliares de enfermagem, já que a ideia é utilizar somente um auxiliar nesse processo. Considera-se também a redução dos afastamentos por doença ocupacional, proveniente do processo tradicional.

Uma vez que a ideia do produto mecatrônico é viável, o passo seguinte é levantar as necessidades dos clientes para o seu desenvolvimento.

#### **6.1.1 Levantamento das Necessidades dos Clientes (NC)**

O objetivo do levantamento das necessidades dos clientes, como já dito, é conhecer a percepção dos usuários do produto mecatrônico em relação à ideia eleita. É necessário, antes de tudo, identificar os clientes.

Analisando a característica do produto e, através da descrição da função global, foram identificados os seguintes clientes:

- a) Enfermeiros que lidam com o serviço de transferência de paciente;
- b) Enfermeiros-Chefe de hospitais;
- c) Médicos;
- d) Pacientes;
- e) Fisioterapeutas;
- f) Padioleiros;
- g) Especialistas no domínio mecânico;
- h) Especialistas no domínio eletrônico;
- i) Especialistas em desenvolvimento em software;
- j) Especialistas em controle.

Definidos os clientes, foram realizadas entrevistas individuais com os envolvidos no produto, através das quais foram levantados os desejos do cliente para o novo produto mecatrônico e também definido o grau de importância de cada um deles. A consolidação de tais informações, que representam as necessidades dos clientes, encontra-se expressa no quadro 14.

Quadro 14 – Necessidades dos clientes consolidadas

<b>NECESSIDADES DOS CLIENTES</b>	<b>Grau Importância</b>
Ter Suporte para Sustentação de Acessórios, Cilindro O <sub>2</sub> e Protuário, etc	2
Envolver o Mínimo de Aux.Enfermagem	5
Oferecer Segurança ao Paciente	5
Oferecer Conforto ao Paciente	4
Ter Mobilidade Operacional	3
Facilitar a Postura de Trabalho dos Aux.Enfermagem	4
Facilitar os Trabalhos de Higienização	3
Ser de Custo Baixo	4
Poder Suportar Paciente Obeso	2
Ser Durável (Confiável)	4
Registrar os Dados dos Usuários e Paciente	3

Fonte: (SANTANA, 2011)

Analisando o quadro 14, observa-se que as necessidades dos clientes que obtiveram maior pontuação foram: “Envolver o mínimo de Aux. Enfermagem” e “Oferecer Segurança ao Paciente”. Esta pontuação se deve basicamente a dois fatores: a grande quantidade de Aux. Enfermagem – mais de quatro – que participam do processo atual de remoção de paciente e o registro de vários afastamentos desses profissionais por doença ocupacional. Outro requisito – que, por vezes, é esquecido – é “Oferecer Conforto ao Paciente”, que obteve a segunda maior pontuação. O enfermo merece cuidados especiais, por exemplo, quando é deslocado pelas superfícies irregulares dos hospitais.

As necessidades dos clientes expressam seus desejos em uma forma qualitativa e nem sempre define especificações de engenharia para continuidade do processo de desenvolvimento. Diante disso, torna-se necessário definir os requisitos de engenharia ou requisitos técnicos do produto, que são expressões que determinam suas características técnicas.

### **6.1.2 Definição dos Requisitos Técnicos do Produto**

A realização das entrevistas possibilitou o conhecimento de soluções existentes utilizadas por alguns hospitais em busca de alternativas capazes de reduzir o processo habitual com utilização de lençol. A maioria delas pertencia ao domínio mecânico, tendo poucas que pertenciam também ao domínio eletrônico. E, quando isso ocorria, tratava-se de um equipamento estacionário.

O conhecimento da existência dessas soluções direcionou a realização de pesquisa na internet, possibilitando verificar o que existia no mercado de soluções para esse problema de projeto, inclusive patentes.

Foram identificados vinte e cinco requisitos técnicos do produto para atendimento das necessidades dos clientes levantadas. Por exemplo, para atender a necessidade principal “Envolver o mínimo de Aux. Enfermagem foram identificados os seguintes requisitos técnicos do produto (requisitos funcionais):

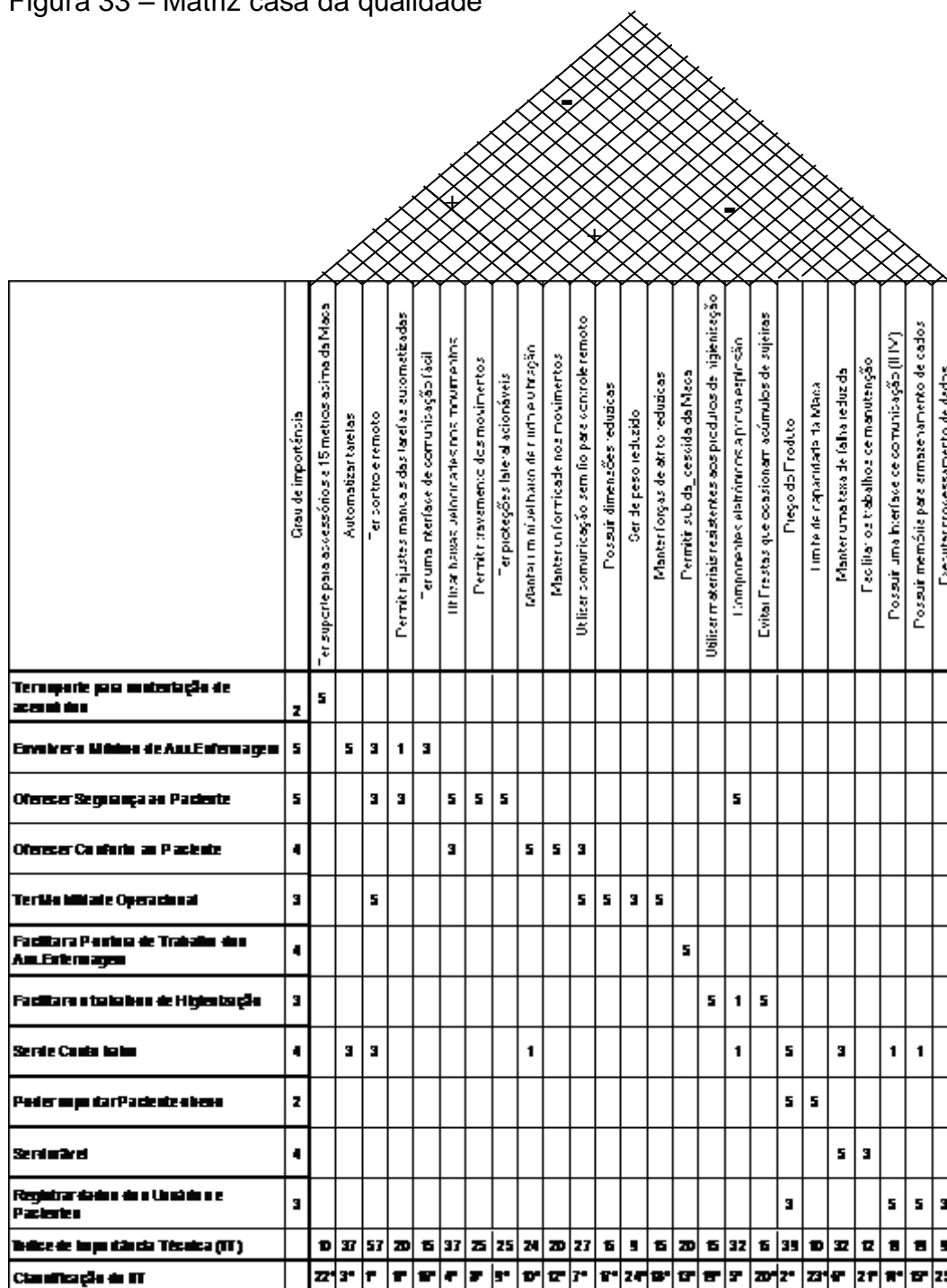
- a) Automatizar tarefas do processo de remoção do paciente;
- b) Ter controle remoto;
- c) Permitir ajustes manuais das tarefas;
- d) Ter uma interface de comunicação “amigável”.

O desafio no desenvolvimento do projeto é automatizar algumas tarefas no processo de transferência do paciente com o objetivo de reduzir para um Aux Enfermagem envolvido no processo. Ter controle remoto é outro requisito necessário para proporcionar mobilidade operacional ao Aux Enfermagem. Permitir ajustes manuais das tarefas automatizadas tem menor impacto, em relação às anteriores, nessa necessidade. Entretanto, seu impacto maior será na necessidade “Oferecer segurança ao Paciente”.



Os requisitos técnicos do produto identificados foram relacionados com as necessidades do cliente através da matriz casa da qualidade ( figura 33). O objetivo foi encontrar o Índice de Importância Técnica (IIT), que prioriza o desenvolvimento do projeto em conformidade com as necessidades do cliente.

Figura 33 – Matriz casa da qualidade



Fonte: (SANTANA, 2011)

A penúltima linha da matriz casa da qualidade registra o IIT calculado e, na última linha, é apresentado uma classificação dos requisitos técnicos do produto em ordem decrescente de prioridade.

No telhado da matriz casa da qualidade foram identificados dois conflitos positivos. O primeiro envolve os requisitos: “Automatizar as tarefas” versus “Manter uniformidade nos movimentos” e, o segundo, “Reduzir o nível de ruído e vibração” versus “Reduzir as forças de atritos”. Atender a um leva a uma contribuição para o atendimento do outro. Foram identificados ainda dois conflitos negativos: entre “Automatizar tarefas” e “Preço do produto” e entre “Limite capacidade da maca” e “Preço do produto”. Atender a um significa prejudicar o correspondente. Esses conflitos negativos devem ser balanceados ao longo do desenvolvimento do projeto, aproveitando o próprio balanceamento das oportunidades que eles oferecem.

Na etapa seguinte de projeto conceitual, são identificadas as subfunções do modelo funcional, responsáveis pelo desempenho funcional do produto mecatrônico. A priorização dessas subfunções ocorre de acordo com o índice de prioridade técnica definido para cada requisito técnico do produto.

## 6.2 PROJETO CONCEITUAL

A análise do projeto conceitual do dispositivo de transferência de paciente se inicia pelo modelo caixa-preta e através da modelagem nos domínios da mecatrônica o modelo funcional do produto mecatrônico é obtido. Em seguida, as alternativas de projeto são construídas.

### 6.2.1 Modelo Caixa - Preta

A função global do produto mecatrônico é: “Transferir Paciente da cama-leito para a maca. O modelo caixa- preta (figura 34) é construído a partir da identificação dos requisitos técnicos que, de alguma forma, dizem respeito às funções do produto. A apresentação aqui está limitada aos dez requisitos que obtiveram maior valor do IIT. O modelo completo com todos os requisitos está representado no apêndice D.

O requisito que obteve maior IIT foi “Ter controle remoto”, seguido do “Preço do produto” e “Automatizar tarefas”. O requisito “Preço do produto” não se refere à função do produto e, por conseguinte, não é relacionado na entrada do modelo caixa-preta.

Como previsto no método CPCPM, a identificação das subfunções que vão operar os fluxos do modelo caixa-preta desde a entrada até a saída, passa antes pela modelagem em cada domínio da mecatrônica, onde começam a ser reveladas as funções que irão compor o modelo funcional do produto mecatrônico.

Figura 34 – Modelo caixa - preta



Fonte: (SANTANA, 2011)

#### 6.2.1.1 Modelagem no Domínio Mecânico

A modelagem no domínio mecânico se inicia pela construção da árvore funcional a partir do desdobramento da função “Transferir Paciente da cama-leito para maca”.

O dispositivo para transferência deve ser capaz de recolher o paciente na cama-leito e trazer para a maca. Após, assegurado que ele está sobre ela, a maca é deslocada com o paciente pelos corredores do hospital.

O modelo abstrato do problema de projeto começa pela condição inicial de repouso do paciente no quarto do hospital sobre a cama-leito que necessita ser

transferido para algum lugar. O equipamento utilizado para executar a transferência é chamado de maca. Nesse contexto, a maca precisa de um dispositivo que reduza as forças de atrito entre ela e a superfície – piso – para facilitar o seu transporte em qualquer direção. Para que o paciente não caia da maca, principalmente em movimentos curvilíneos, ela deve ter proteções laterais removíveis para garantir a sua segurança.

Considerando que existem algumas irregularidades no piso do hospital, responsáveis por vibração da maca, na ocasião de uma transferência, deve ser previsto um dispositivo de amortecimento para aumentar o conforto do paciente.

A maca encosta na cama-leito e necessita ser capaz de trazer o paciente sobre ela, ou seja, ele, deitado sobre a cama-leito, deve ser deslocado para a maca, com a finalidade de ser transferido. Nesse processo, a movimentação do paciente precisa ser a menor possível, pois isso assegurará seu conforto. Determinadas ações, como arrastá-lo ou suspendê-lo, devem ser evitadas. O movimento de mudar a posição normal de repouso com a barriga para cima e girar o seu corpo para a posição lateral é a que possibilita menor desconforto. Tendo uma plataforma que encoste no paciente sobre a cama-leito, bastaria retorná-lo para a posição normal de repouso que ele ficaria com metade do corpo sobre esta plataforma. Se algum dispositivo fosse capaz de movimentar sua superfície, traria o paciente para cima da plataforma. Esse movimento tem que ser uniforme para garantir o conforto do paciente e utilizar baixas velocidades para garantir a sua segurança.

Essa plataforma tem que fazer parte da maca, uma vez que o paciente está sobre ela e agora precisa ser deslocado pelos corredores do hospital. Portanto, é necessário que exista um dispositivo que execute o movimento de translação de aproximação da plataforma junto ao paciente e vice-versa. Essa operação tem que ser segura e cuidados especiais devem ser levados em consideração quando a plataforma se aproxima do paciente, para garantir a sua segurança e conforto.

Esse movimento cria um desbalanceamento do centro de gravidade da maca, o que pode vir a ocasionar o seu tombamento. Um dispositivo que pudesse acoplar a maca à cama-leito, tornando-os um conjunto de dois corpos rígidos, favoreceria a eliminação desse problema, sem a necessidade de grandes reforços.

Uma vez que a plataforma na posição de repouso tende a ficar no mesmo nível da cama-leito, é necessário que ocorra um movimento linear vertical para

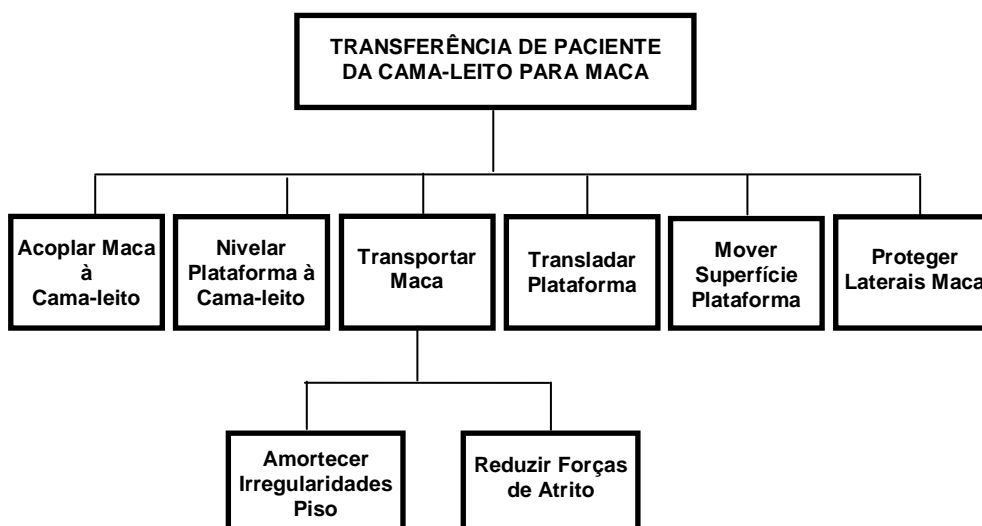
permitir o posicionamento adequado da plataforma, em relação à cama-leito, para execução do movimento de translação, abordado anteriormente.

Analisando o modelo abstrato, podem ser identificados as seguintes funções principais da função global:

- a) Reduzir forças de atrito;
- b) Proteger laterais da maca;
- c) Amortecer irregularidades do piso;
- d) Movimentar superfície da plataforma da maca
- e) Transladar a plataforma da maca
- f) Acoplar maca à cama-leito;
- g) Nivelar maca à cama-leito.

Na árvore funcional (figura 35) do dispositivo de transferência de paciente, estão relacionadas as funções principais. As funções “*Reduzir Forças de Atrito*” e “*Amortecer Irregularidades do Piso*” são funções secundárias que compõem a função principal que é “*Transportar Maca*”.

Figura 35 – Árvore funcional



Fonte: (SANTANA, 2011)

Para atender o requisito de utilização de um número mínimo de Aux.Enfermagem, é necessário a automatização de algumas funções. Para esse objetivo foram selecionadas as funções “*Nivelar Maca*”, “*Transladar Plataforma*” e

“*Movimentar Superfície Plataforma*”, uma vez que essa ação facilita a operacionalidade do dispositivo de transferência de paciente, possibilitando a redução da quantidade de profissionais envolvidos. As demais funções por envolverem operações mais simples, não serão automatizadas.

Para as funções que vão interagir com o sistema mecatrônico o CPCPM recomenda a elaboração dos casos de uso. A função “*Transladar Plataforma*” é descrita por dois casos de uso. O primeiro descreve o movimento de translação na direção de aproximar a plataforma para junto do paciente. O segundo descreve o movimento em sentido contrário, ou seja, trazer a plataforma para a posição referência zero (a plataforma sobre a estrutura da maca).

A pesquisa realizada na busca de produtos similares existentes, exemplos no anexo I, direcionou para a função “*movimentar superfície da plataforma*” ser realizada através de uma esteira rolante. A esteira representa a superfície da plataforma e o seu giro possibilita que qualquer objeto indivíduo encostado nela seja recolhido ou afastado por ela, a depender do sentido de rotação. A seguir, é apresentado o caso de uso da função “*Transladar Plataforma*” (figura 36) para junto do paciente – os demais casos de uso estão inseridos no apêndice E.

Nesse caso de uso, podem ser observados os atores envolvidos, o **Sistema** e o **Aux.Enfermagem**. O **Sistema** representa o software de controle do sistema mecatrônico, enquanto o **Aux.Enfermagem** representa o operador do dispositivo de transferência de paciente

As pré-condições são os requisitos necessários para que o caso de uso possa iniciar. Em seguida, são descritos os fluxos de eventos necessários para operacionalização da função para atingir o seu objetivo. A pós-condição, é o resultado da execução do caso de uso.

Na descrição do caso de uso já aparecem alguns componentes necessários ao movimento e controle do funcionamento da função. O atuador  $A_2$  é o acionador responsável pela translação da plataforma e seu deslocamento é informado pelo sensor  $S_5$  que fornece sua posição exata, o que permite o controle da velocidade do movimento de translação. Existe uma velocidade  $v_1$ , quando a distância entre a plataforma e o paciente é maior do que a variável  $x_1$ , e outra velocidade  $v_2$ , quando a distância é menor. O parâmetro  $x_1$  identifica o afastamento mínimo entre o paciente e a plataforma, que permite uma velocidade de translação ( $v_1$ ) maior, com

o objetivo de reduzir o tempo de deslocamento da plataforma, quando ela não está deslocando o paciente. Quando o parâmetro  $x_1$  é atingido, a velocidade de deslocamento é reduzida para o valor  $v_2$ , que é uma velocidade bastante reduzida que oferece segurança ao processo de aproximação da plataforma para junto do paciente. Esses parâmetros podem ser configurados durante o processo de comissionamento e operacionalização do dispositivo.

Figura 36 – Caso de uso transladar plataforma (sair)

<i>Transladar Plataforma para junto do paciente</i>	
Atores:	<b>Sistema e Aux.Enfermagem</b>
Pré-condição:	A superfície inferior da plataforma está nivelada com a superfície superior da cama-leito. O Paciente está posicionado lateralmente sobre a cama-leito.
Fluxo de Eventos:	O <b>Sistema</b> aciona a translação da Plataforma por meio do atuador $A_2$ , na direção de aproximá-la do paciente.
	Deve existir um limite de velocidade maior quando a diferença entre a plataforma e o paciente for maior do que $x_1$ , e outro limite quando essa diferença for menor do que $x_1$ . O controle de velocidade do atuador $A_2$ é através do sensor $S_5$ .
	Quando a distância entre a plataforma e o paciente for satisfatória, por meio dos sensores $S_1$ e $S_2$ , o <b>Sistema</b> cessa a translação da plataforma. Por segurança, sensores mecânicos devem ser adicionados para evitar choque da plataforma com o paciente.
	O <b>Aux.Enfermagem</b> verifica se a posição da plataforma, em relação ao paciente, é satisfatória para sua remoção da cama-leito. Se não é satisfatória, o <b>Aux.Enfermagem</b> ajusta a plataforma manualmente. Se é satisfatória, o <b>Aux.Enfermagem</b> aciona o <b>Sistema</b> para continuar com o processo.
	O <b>Sistema</b> trava o movimento de translação da plataforma para impedir deslocamentos espúrios.
	A plataforma está posicionada corretamente junto ao paciente. O paciente está escostado na plataforma.
Pós-condição:	

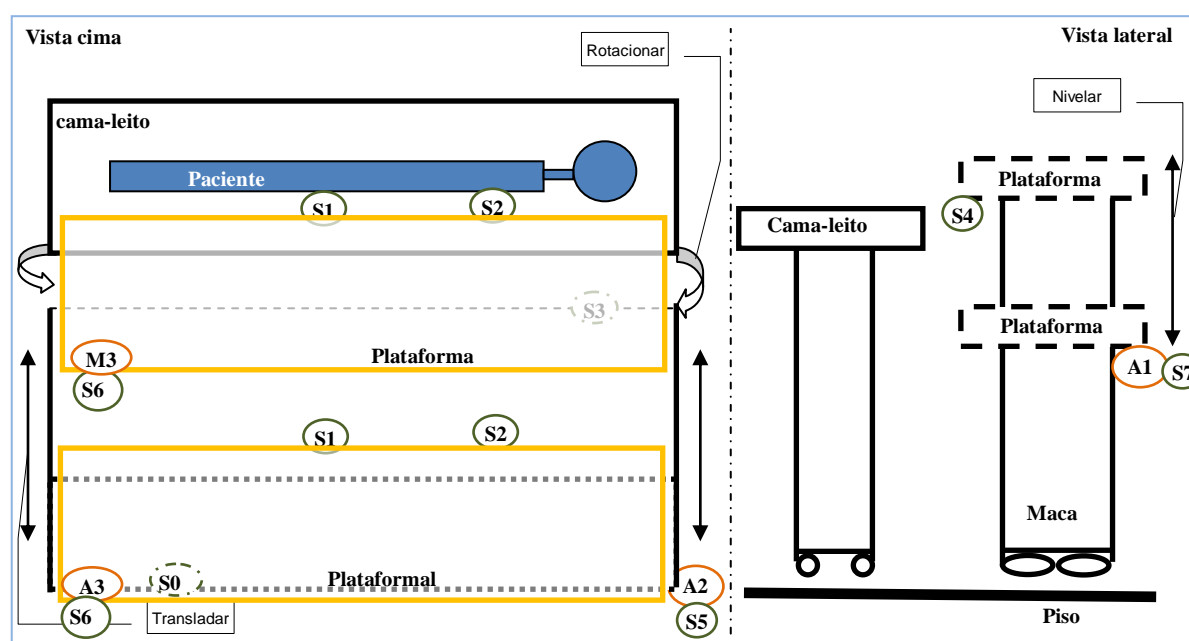
Fonte: (SANTANA, 2011)

Os sensores  $S_1$  e  $S_2$  normalmente estão no estado ocioso, passando para o estado ativo quando a plataforma atinge a distância satisfatória em relação ao paciente. O sensor  $S_0$  indica a posição de referência zero, ou seja, quando ele está ativo significa que a plataforma encontra-se na posição de referência zero, sobre a estrutura da maca.

Como esse processo interage com vidas humanas fragilizadas, o caso de uso revelou a necessidade, por questões de segurança, de verificação e, se necessário, ajuste manual por parte do **Aux.Enfermagem**, antes do **Sistema** dar continuidade ao processo. Deve haver, portanto, uma interação entre ambos durante a operacionalização da função “*Transladar Plataforma*”. Isso direciona para a necessidade de uma Interface Homem Máquina (IHM) que possibilite a comunicação entre os atores: o **Aux.Enfermagem** e o **Sistema**. Essa necessidade de ter uma IHM é reforçada pelo requisito “*Registrar dados dos Usuários e Paciente*”. Essa interface deverá ser portátil para atendimento ao requisito técnico “*Ter controle remoto*”, e será denominada de CR – Controle Remoto. O **Sistema**, que é o software de controle, está inserido em um hardware com capacidade de armazenamento e processamento de dados que será denominado de UCM – Unidade de Controle Mecatrônica.

A partir do desdobramento da função global e elaboração dos casos de uso, um diagrama simplificado (figura 37) é elaborado para dar uma ideia de como pode operar o sistema, procurando identificar as necessidades de sensores e atuadores para as funções que vão interagir com o sistema mecatrônico.

Figura 37– Diagrama simplificado do sistema mecatrônico



Fonte: (SANTANA, 2011)



No diagrama simplificado, estão identificados sete sensores e três atuadores necessários para atender o controle da trajetória do movimento do sistema mecatrônico. Os sensores estão representados pela letra S, enquanto os atuadores pela letra A.

A relação de sensores e atuadores identificados no diagrama simplificado está descrita no quadro 15. Um grupo de sensores têm a finalidade de detectar a aproximação de um objeto, portanto, sensores de proximidade, enquanto o outro grupo tem a finalidade de medir o deslocamento, fazendo parte dos sensores de posição\_deslocamento.

Quadro 15 – Descrição dos sensores e atuadores

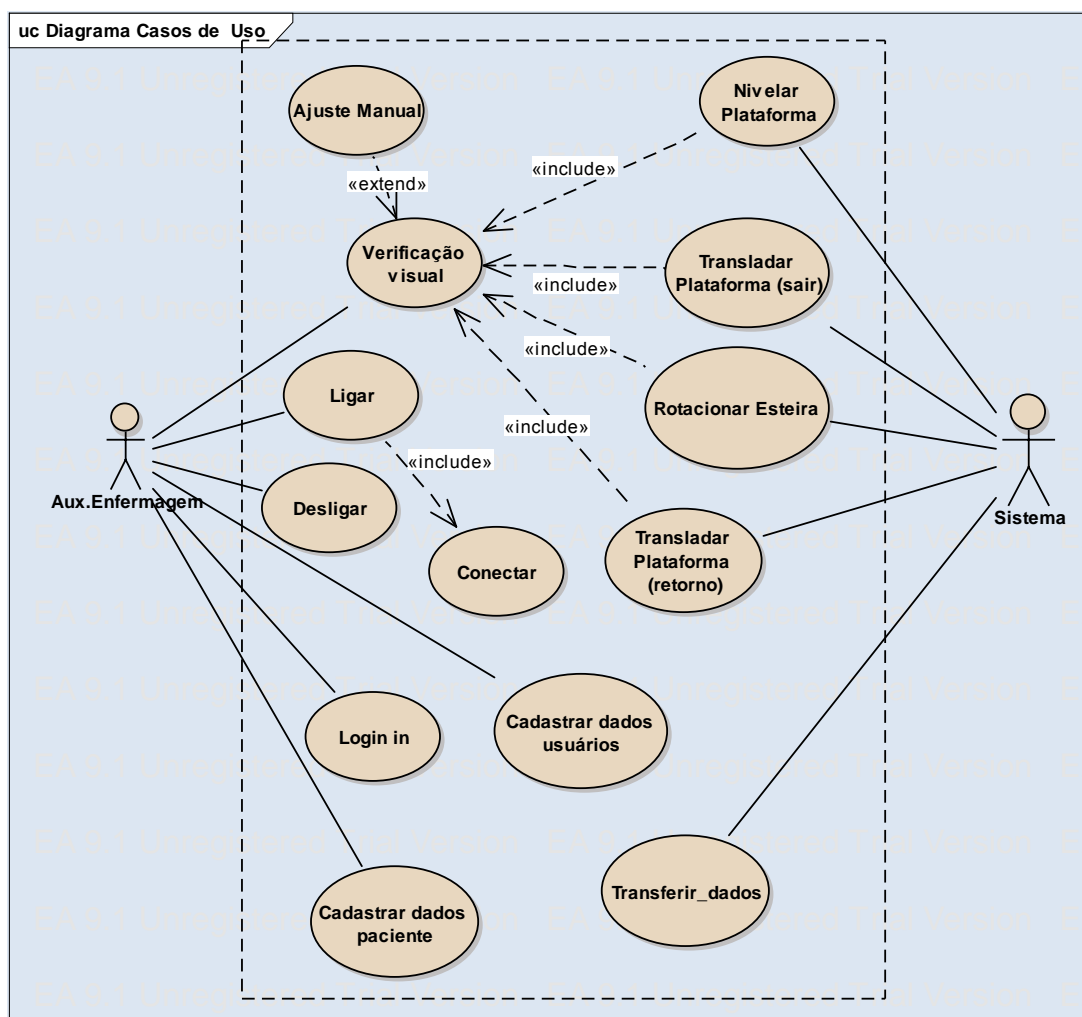
Código	Tipo	Função
S0	Sensor	Detectar a posição referência zero da Plataforma sobre à Maca.
S1	Sensor	Detectar a aproximação da Plataforma junto ao Paciente no movimento de translação
S2	Sensor	Detectar a aproximação da Plataforma junto ao Paciente no movimento de translação
S4	Sensor	Detectar a coincidência entre a superfície superior da cama-leito e inferior da Plataforma
S5	Sensor	Medir o deslocamento de translação da Plataforma – associado ao atuador A2
S6	Sensor	Medir o deslocamento do movimento da superfície da Plataforma - associado ao atuador A3
S7	Sensor	Medir o deslocamento vertical da Plataforma – associado ao atuador A1
A1	Atuador	Fornecer Energia Mecânica para o movimento vertical da Plataforma
A2	Atuador	Fornecer Energia Mecânica para o movimento de translação da Plataforma
A3	Atuador	Fornecer Energia Mecânica para o movimento da superfície da Plataforma

Fonte: (SANTANA, 2011)

### 6.2.1.2 Modelagem no Domínio de Software

Os casos de uso mostraram os fluxos de eventos que ocorrem em cada um, sem, contudo, revelar como acontece a interação entre eles. O diagrama de casos de uso (figura 38) representa o comportamento que o sistema mecatrônico executa em colaboração com um ou mais atores e casos de uso, sem revelar a sua estrutura interna.

Figura 38 – Diagrama de casos de uso



Fonte: (SANTANA, 2011)

No diagrama de casos de uso foram identificados dois atores, que representam as duas formas de controle identificadas para a maca. O controle manual representado pelo ator *Aux.Enfermagem* e o controle automático representado pelo ator *Sistema*.

O acesso do *Aux.Enfermagem* ao CR – Controle Remoto – acontece quando é concluído o caso de uso “*Log in*”. Esse caso de uso utiliza obrigatoriamente o caso de uso “*Cadastrar dados do Usuário*”, representado pela relação de <<include>> ligando o primeiro ao segundo. Isso significa que é verificado se o usuário está cadastrado no *Sistema*. Se não estiver cadastrado, ele se cadastra e retorna a fazer o “*log in*”. Uma vez acessado o CR, ele está liberado para utilizar todas as suas funcionalidades.

O caso de uso “*Ligar*” tem a finalidade de ativar a UCM – Unidade de Controle Mecatrônica. Ele é responsável por estabelecer uma conexão entre o CR e a UCM, carregando configurações iniciais nesta. A partir daí, a UCM está apta a receber novos comandos. Quando concluído, por exemplo, o recolhimento do paciente para a maca, o *Aux.Enfermagem* pode desligar a UCM através do caso de uso “*Desligar*”, onde a conexão é cessada, salvando as configurações atuais para que estas sejam carregadas na próxima vez que a UCM for ligada. Isso é importante para preservar o status atual de posicionamento do paciente. Considerando aspectos de segurança, é essencial que a UCM tenha um mecanismo de supervisão da conexão com o CR. Deve ser levado em consideração um “*estado segurança*” para preservar a integridade da UCM até que a conexão seja restabelecida.

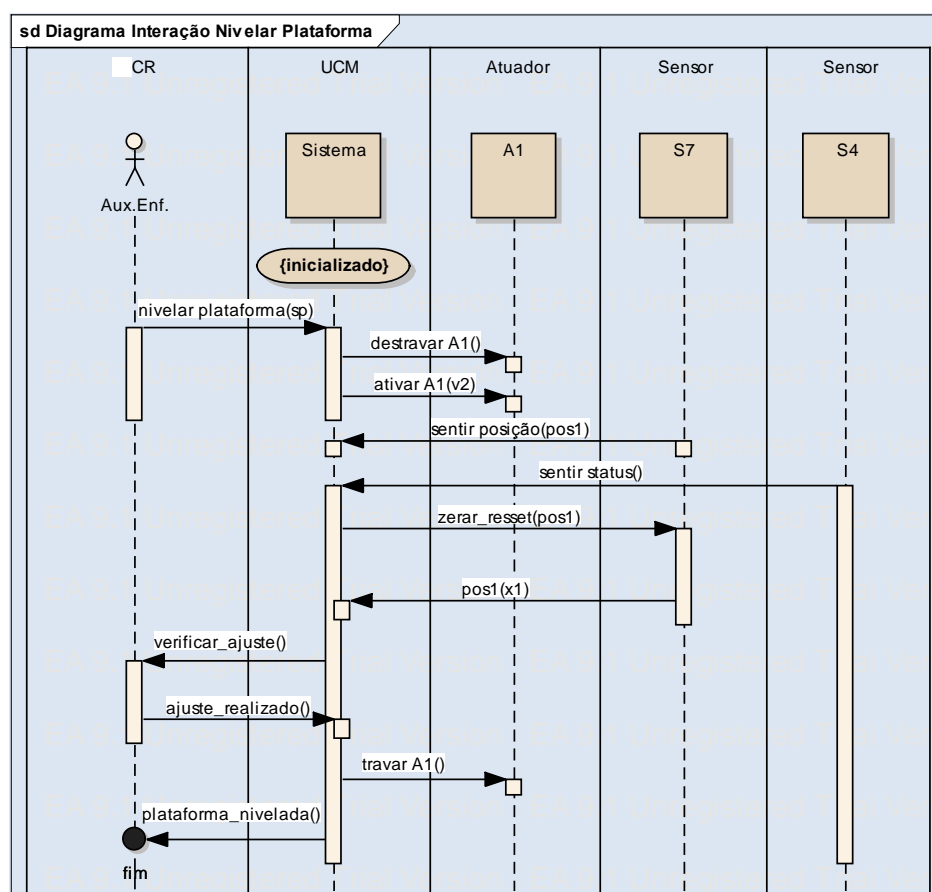
O caso de uso “*Transferir\_dado*” descreve a transferência de dados da CR para a UCM, quando novos dados são inseridos.

Na operacionalização de transferência de paciente o *Sistema* utiliza os seguintes casos de uso: “*Nivelar Plataforma*”, “*Transladar Plataforma(sair)*” para junto do paciente, “*Rotacionar Esteira*”, “*Transladar Plataforma(retornar)*” para posição referência zero. Como representado no diagrama, a conclusão de cada caso de uso depende do caso de uso “*Verificação Visual*”. Essa condição está representada pela relação de inclusão <include> entre eles. Por outro lado, o caso de uso “*Verificação Visual*” mantém uma relação de extensão <extend> com o caso de uso “*Ajuste Manual*”, significando que a instância do primeiro pode ser acrescentada pelo comportamento do segundo se necessário. Essa situação é o caso em que na verificação visual o *Aux.Enfermagem* entende que é necessário realizar ajustes manuais.

A visão de caso de uso mostra conceitualmente o conjunto de funções que o sistema mecatrônico deve executar para atender os requisitos do cliente. O diagrama de casos de uso oferece uma visão geral dos relacionamentos entre eles, sem, contudo, se preocupar com os fluxos de eventos que acontecem dentro deles. Isso é suplementado pela construção dos diagramas de interação que são responsáveis por mostrar como o fluxo de eventos ocorrem por meio dos casos de uso, representado pelas mensagens trocadas entre os atores *Aux.enfermagem*, *Sistema* e objetos envolvidos.

O diagrama de interação do caso de uso “*Nivelar Plataforma*” (figura 39), apresenta a troca de mensagens entre os atores e os objetos envolvidos na operacionalização da função “*Nivelar Plataforma*”. Nele, as “raias” são faixas que dividem o diagrama de interação em áreas lógicas ou *partições*. Cada partição, destina-se a um objeto, por exemplo, CR (controle remoto), UCM (unidade de controle mecatrônica), e os atuadores e sensores envolvidos com o caso de uso. Também a linha vertical pontilhada – “linha de vida” – representa a vida do objeto durante uma interação. No apêndice E encontra-se detalhado o diagrama de interação dos demais casos de uso.

Figura 39 – Diagrama de interação do caso de uso nivelar plataforma



Fonte: (SANTANA, 2011)

No início, o *Aux.Enfermagem*, através da IHM do CR, envia uma mensagem “*Nivelar Plataforma*” para o *Sistema*, representado pela UCM. Esta, por sua vez, envia uma mensagem “*Destruvar atuador A<sub>1</sub>*” para o objeto A<sub>1</sub>, que retorna uma

mensagem “*Atuador  $A_1$  destravado*” (não representada por ser uma mensagem óbvia).

Em seguida, a UCM envia outra mensagem “*Ativar atuador  $A_1$* ” para o mesmo objeto, que inicia a translação vertical da plataforma. O objeto  $S_7$ , sensor de deslocamento, envia continuamente um sinal da posição da plataforma para a UCM, representado pela mensagem “*sentir posição(pos<sub>1</sub>)*”. O objeto  $S_4$ , sensor de proximidade, quando é sensibilizado, envia uma mensagem “*Sentir status*”, que significa que a superfície inferior da plataforma está coincidindo com a superfície superior da cama-leito. A UCM, nesse momento, zera (resset) a pos<sub>1</sub> tomando esse ponto como uma referência para o cálculo da folga, representada no diagrama de interação pela mensagem “*zerar\_resset(pos<sub>1</sub>)*”.

A folga que deve existir entre a superfície superior da cama-leito e a superfície inferior da Plataforma foi definida, no caso de uso “*Nivelar Plataforma*”, como o valor da variável  $x_1$ . Quando essa folga é atingida, representada pela mensagem “*pos<sub>1</sub>( $x_1$ )*”, o *Sistema* envia uma mensagem “*desativar  $A_1$* ”, para o objeto  $A_1$ , e este retorna uma mensagem “*atuador  $A_1$  parado*”.

A UCM, nesse instante, envia o comando para o controle remoto, representado pela mensagem “*Verificar ajuste*”. O *Aux.Enfermagem* verifica se o nivelamento está correto, refazendo-o, se necessário, com ajustes manuais. Seguidamente, retorna o comando para o *Sistema* representado pela mensagem “*ajuste realizado*”.

Finalmente, quando o *Sistema* recebe esta mensagem, envia outra para o objeto  $A_1$  “*travar  $A_1$* ”, garantindo que não ocorra um desnivelamento da plataforma por falhas espúrias. Essa última mensagem vem atender a um dos requisitos técnicos do produto que é o “*travamento dos movimentos*”.

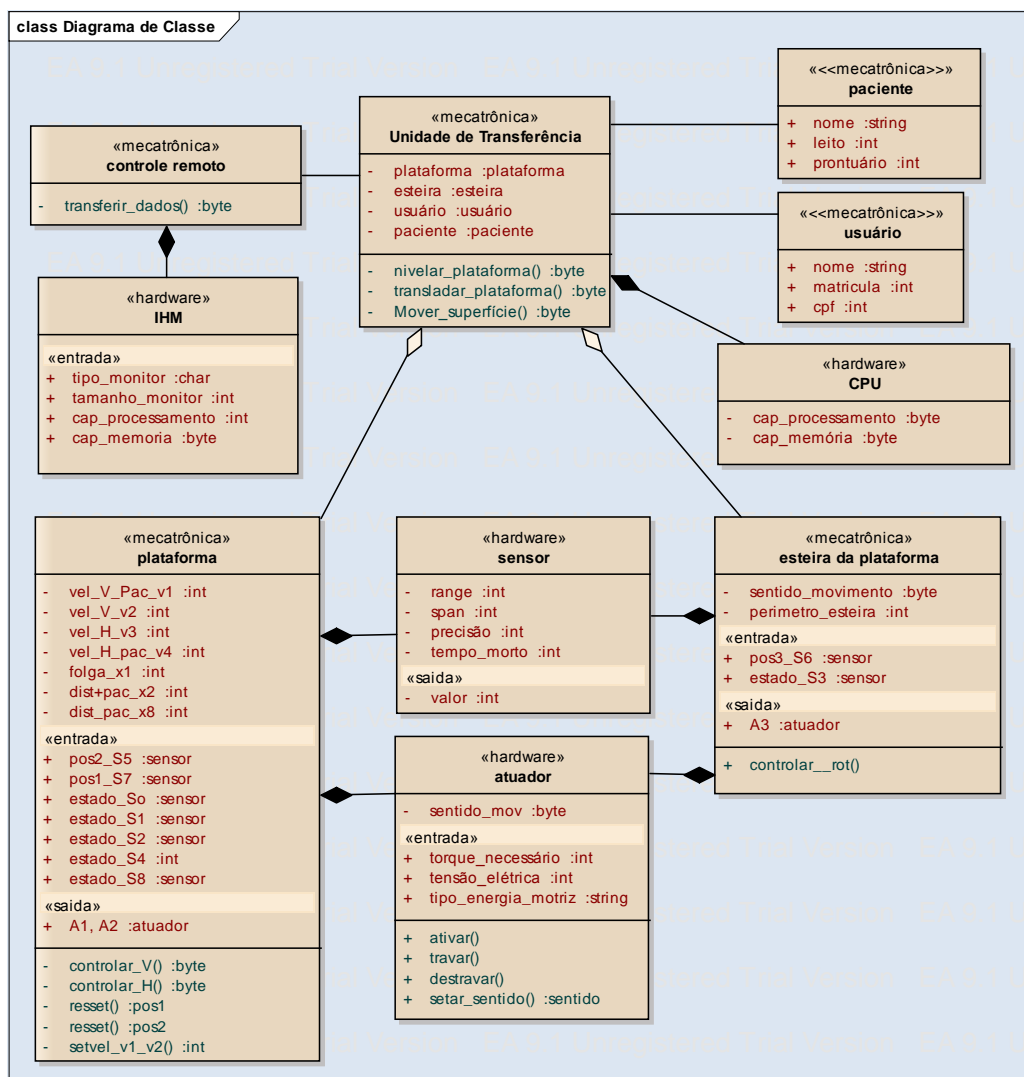
Concluindo, o *Sistema* envia a mensagem “*plataforma nivelada*” para o CR e o diagrama de interação do caso de uso “*Nivelar Plataforma*” é encerrado.

Como se observa, algumas mensagens representam operações que o *Sistema* deve realizar na classe objeto, como por exemplo, ativar, sentir, resset, etc.

O diagrama de interação oferece uma visão geral da sequência de operação do processo, facilitando a identificação dos objetos envolvidos.

O diagrama de classe (figura 40) mostra a estrutura estática do modelo, representando os relacionamentos entre os objetos envolvidos e a sua estrutura interna.

Figura 40 – Diagrama de classe do sistema mecatrônico



Fonte: (SANTANA, 2011)

Nesse desenvolvimento, a partir dos casos de uso e diagramas de interação foram identificados dois objetos mecatrônicos principais: “Plataforma” e “Esteira”. O software, definido pela classe “Unidade de Transferência” é composto de duas classes de agregação por compartilhamento, que representam os componentes de

software dos dois objetos identificados. Em cada componente, estão definidos os atributos estereotipados <<entrada>> e <<saída>>, representando a interface de entrada e saída de sinais e parâmetros de dados, que permite a interação e sincronização com o resto do sistema de controle.

A interface de E/S de informações de sensores e comando dos atuadores, requerida para controlar a parte física do objeto mecatrônico, está representada pelas classes <<hardware>> sensor e atuador, utilizando uma agregação forte de composição com a classe mecatrônica. Nela, os atributos <<entrada>> e <<saída>> representam as portas E/S do hardware do objeto mecatrônico.

A classe <<mecatrônica>> controle remoto representa a IHM – interface homem máquina – que possibilita a comunicação com a unidade de transferência e o cadastramento de dados dos usuários e paciente. Finalmente, a classe <<hardware>> IHM e CPU, que representam a parte eletrônica em que o software está suportado.

O diagrama de classe revela a estrutura estática do modelo, com a definição dos objetos do modelo mecatrônico necessários para a construção do software e as relações que ocorre entre eles. Contudo, não se sabe o que acontece internamente com o objeto em cada classe em tempo de execução, ou seja, o comportamento dinâmico do sistema, fato importante e necessário para a elaboração da lógica de controle do produto mecatrônico.

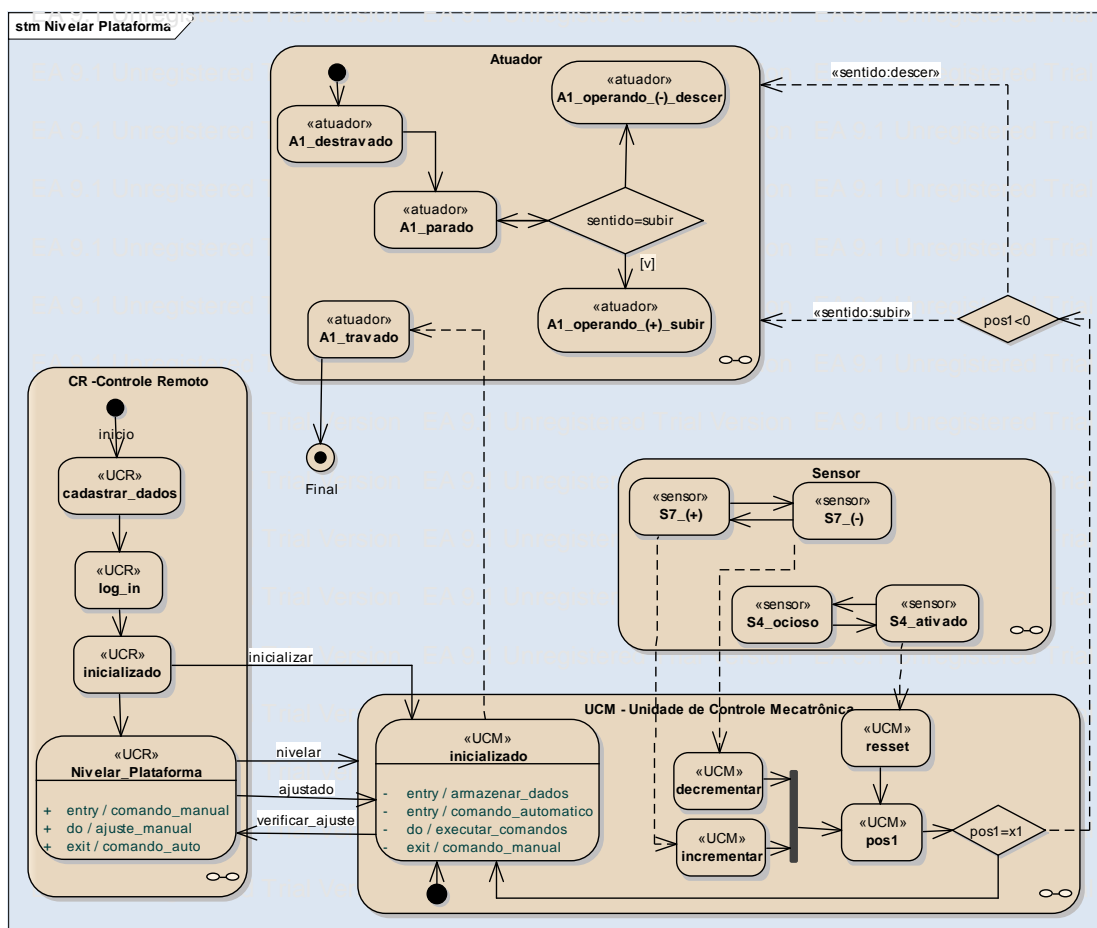
### 6.2.1.3 Modelagem no Domínio do Controle

A representação do comportamento dinâmico do *Sistema* é fornecida pelos diagramas de estado, denominado de *statechart*, onde é mostrado o que acontece internamente com os objetos em tempo de execução.

Foram desenvolvidos três *statecharts* para revelar o comportamento dinâmico do sistema mecatrônico. Os dois primeiros representam o comportamento dinâmico da classe <<mecatrônica>> *plataforma*: *statechart* “*Nivelar Plataforma*” e “*Transladar Plataforma*”.

O terceiro representa o comportamento dinâmico da classe <<mecatrônica>> *Esteira: statechart “Rotacionar Esteira”*. A seguir, é apresentado o *statecharts “Nivelar Plataforma”* (figura 41). Os demais estão detalhados no apêndice E

Figura 41 – *Statechart Nivelar Plataforma*



Fonte; (SANTANA, 2011)

O *statechart “Nivelar Plataforma”* possui quatro superestados, revelando o que acontece dentro das classes <<mecatrônica>> envolvida com o processo de nivelamento da Plataforma: *CR, UCM, Atuador e Sensor*.

O início do processo é representado no *statechart* por uma bola preta, apontando para o estado que inicia o processo. Por exemplo, no CR – Controle Remoto – o início é pelo estado “log in”, enquanto no superestado Atuador, o início é pelo estado “destravar A<sub>1</sub>”.



O estado “*log in*” do estereótipo <<CR>>, representa a condição necessária para utilização do dispositivo. É necessário que a pessoa responsável pela operação do dispositivo faça “*log in*” no CR. Uma vez realizado o “*log in*”, o CR passa para o estado cadastrar dados <CR>, onde é permitido o *Aux.Enfermagem* entrar com os dados operacionais necessários ao controle do *Sistema* e os dados do paciente, como mostrado anteriormente no diagrama de classes.

Após o cadastramento dos dados, o CR passa para o estado de <<CR>>*iniciação*, na qual é realizada a comunicação com a UCM, e os dados cadastrados são transferidos. Uma vez finalizada a comunicação entre o CR e a UCM – Unidade de Controle Mecatrônica –, esta passa para o estado “*iniciado*”, em condições de funcionamento, aguardando algum novo comando.

Quando o *Aux.Enfermagem* aciona, na IHM do CR, o comando “*Nivelar\_Plataforma*”, uma ação é enviada para o superestado, representada pela seta nivelar. O *Sistema* inicia, então, o processo de nivelamento da plataforma.

No superestado Atuador, o início do processo se dá através do estado “*A<sub>1</sub> destravado*”, significando que o *Sistema* destrava o Atuador *A<sub>1</sub>*, passando-o para o estado “*A<sub>1</sub> parado*”, ou seja, o atuador *A<sub>1</sub>* está liberado para operar. Nessa condição, o atuador *A<sub>1</sub>* fica comutando entre o estado “*A<sub>1</sub> parado*” e o estado “*A<sub>1</sub> operando*”.

Quando o sensor *S<sub>4</sub>* passa do estado “*ocioso*” para o estado “*ativado*”, significando que a parte inferior da plataforma coincide com a parte superior da cama-leito, um sinal é enviado para o *Sistema*, o qual zera (*reset*) o valor da variável **pos<sub>1</sub>**.

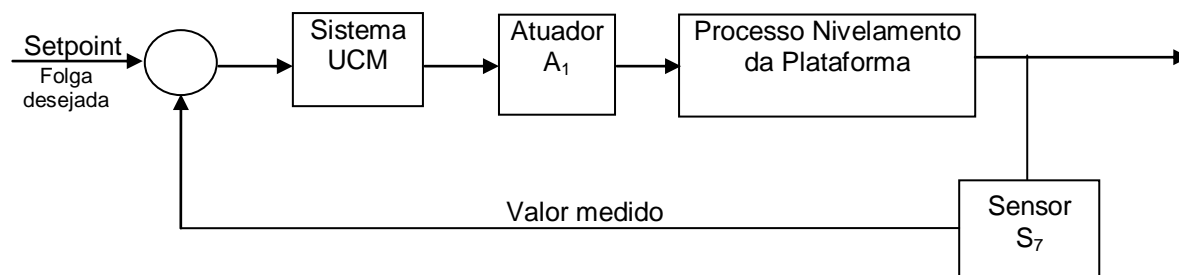
A folga é definida como a distância entre a parte inferior da plataforma e a parte superior da cama-leito, definido no caso de uso como *x<sub>1</sub>*. O objetivo do nivelamento é manter a folga nesse valor desejado (*setpoint*). Na malha de controle (figura 42) o *Sistema*, representado pela UCM, recebe as informações do posicionamento da plataforma através do sensor *S<sub>7</sub>* e compara esse valor com o valor do *setpoint*, ou seja, *x<sub>1</sub>*.

Se o resultado é positivo, ou seja, o *setpoint* é maior que o valor medido, o *Sistema* envia um sinal para que o atuador *A<sub>1</sub>* eleve a plataforma. Caso contrário, o sinal enviado determina que o atuador *A<sub>1</sub>* à desça.

Quando o *setpoint* é atingido, significando que a plataforma está nivelada, o *Sistema* passa o comando para o CR, representada no *statechat* pela seta verificar

ajuste saindo do superestado, e fica aguardando o retorno da informação de que o nivelamento da plataforma foi verificado.

Figura 42 – Malha de controle do nivelamento da plataforma



Fonte: (SANTANA, 2011)

Quando o comando é retornado do CR, representado no *statechart* pela seta ajustado, o *Sistema* envia um sinal para o atuador  $A_1$  passar para o estado “ $A_1$  travado”, e finaliza todo o processo, representado pela seta saindo do superestado para um ponto negro dentro de um círculo branco.

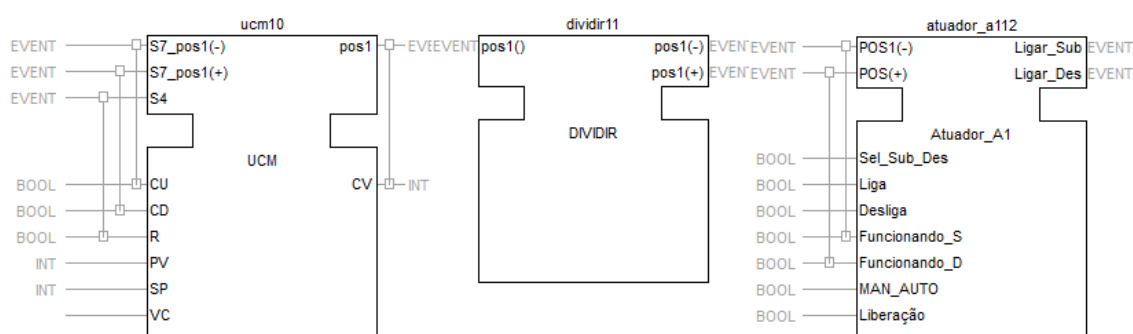
No superestado *UCM*, pode ser observado que a representação dos estados: “*decrementar*”, “*incrementar*”, “*reset*” e “*pos<sub>1</sub>*”, pode ser representado por um bloco de funções FB – *Function Block* – (figura 43), de acordo com os padrões de blocos de funções especificados na IEC\_61499-2.

O bloco de função UCM (figura 43) é um bloco de função padrão que possui um contador incremental/decremental e está adaptado para representar as condições de controle do nivelamento da plataforma. Os dados e parâmetros representados na parte inferior, “corpo” do bloco representam:

- a) CV é a saída do contador que é incrementada a cada pulso que chega da variável de entrada de dados CU, e decrementada quando o pulso chega através da variável CD.
- b) Quando R recebe um pulso ele zera (*reset*) o valor CV do contador.
- c) PV é o valor final crescente da saída do contador CV e o início decrescente.
- d) SP é o *setpoint* do controle de nivelamento da Plataforma correspondente a folga  $x_1$ .

- e) VC é a variável controlada  $pos_1()$ , correspondente ao deslocamento vertical da plataforma.

Figura 43 – Bloco de função CTUD da IEC-61499



Fonte: (SANTANA, 2011)

Na parte superior do bloco, “cabeça” do bloco, acontece os fluxos de eventos, que se comunicam com a parte externa do bloco. O fluxo de evento de entrada  $S_{7\_+}$  recebe o pulso gerado pelo sensor  $S_7$ , quando a plataforma está subindo. Esse evento está ligado à variável de dados CU, que vai incrementar o contador CV. O fluxo de evento de entrada  $S_{7\_(-)}$  recebe um pulso gerado pelo sensor  $S_7$ , quando a plataforma está descendo. Esse evento está ligado à variável de dados CD que vai decrementar o contador CV. Verificam-se, no bloco à direita, as ligações entre os eventos e as variáveis de dados registrando o dito acima.

Por outro lado, o fluxo de evento de entrada  $S_4$  está ligado ao *reset* R, significando que, ao receber o pulso gerado pelo sensor  $S_4$ , a saída do contador é zerada, sendo esse ponto a referência para encontrar a folga.

O evento de saída é o valor de  $pos_1()$  que, no bloco, está ligado ao CV que é o contador.

A saída  $pos_1()$  do bloco de função UCM é a entrada para o bloco DIVIDIR, que tem a finalidade de dividir o evento de entrada em dois eventos de saída: o primeiro no caso de  $pos_1(-)$  ser menor do que zero, enquanto o segundo quando o valor de  $pos_1(+)$  seja maior do que zero.

O terceiro bloco de funções, Atuador\_A<sub>1</sub>, tem a finalidade de representar os comandos que são enviados pela UCM para o atuador. Esse bloco tem as seguintes variáveis de dados na entrada:

- a) Sel\_Sub\_Des tem a finalidade de selecionar o sentido do movimento vertical da plataforma: subir (Sub), descer (Des);
- b) Liga é o comando manual para ativar o atuador\_A<sub>1</sub>;
- c) Desliga é o comando manual para desativar o atuador\_A<sub>1</sub>;
- d) Funcionando\_S é o comando automático para subir a plataforma;
- e) Funcionando\_D é o comando automático para descer a plataforma;
- f) MAN\_AUTO é a opção para utilizar as operações em automático, executadas pelo ator *Sistema*, ou manual, executadas pelo ator *Aux.Enfermagem*;
- g) Liberação é a informação de que o atuador\_A<sub>1</sub> está destravado.

Como pode ser observado no bloco, os eventos de saída Liga\_Sub e Liga\_Des vão direcionar as ações do atuador\_A<sub>1</sub>, no sentido de subir ou descer a plataforma.

Quando o *setpoint* (SP) é atingido, o atuador\_A<sub>1</sub> é desativado e o comando é transferido para o Controle Remoto (CR) a fim de aguardar a verificação do ajuste.

O *Aux.Enfermagem* verifica o ajuste e, como indicado no bloco de funções atuador\_A<sub>1</sub>, ele pode fazer os ajustes necessários pelo acionamento manual do atuador.

A representação dos *statecharts* possibilita a compreensão do comportamento dinâmico do sistema mecatrônico e facilita a identificação dos Blocos de Funções (FB) necessários para o conhecimento e entendimento dos engenheiros de controle na elaboração da lógica de controle.

#### 6.2.1.4 Modelagem no Domínio Eletrônico

As modelagens anteriores permitiram identificar os principais componentes de hardware com maior incidência de componentes eletrônicos: o CR – Controle Remoto e a UCM – Unidade de Controle Mecatrônica.

O controle remoto deve possuir uma IHM – Interface Homem Máquina, uma vez que uma das necessidades dos clientes determina um controle dos usuários para garantir a rastreabilidade do uso do dispositivo. Para isso é importante o cadastramento de dados dos usuários e pacientes que vão utilizar o dispositivo, evitando que pessoas não autorizadas possam manuseá-lo. Ele terá uma CPU, como também a UCM, mas, de capacidade limitada para somente armazenar os dados que estão sendo cadastrados até a transferência para a UCM.

Os componentes eletrônicos devem ser a prova de explosão, principalmente os de armazenamento de energia em conformidade com os requisitos de segurança, e também projetados para que não sofram contaminação com os produtos de higienização do dispositivo.

A comunicação entre o CR e a UCM deve ser sem fio, por exemplo, rádio, wireless, bluetooth, etc. Isso propiciará mobilidade do operador na execução das tarefas com segurança e conforto para o paciente, uma vez que permite deslocamentos do *Aux.Enfermagem* sem ter que passar o fio de comunicação sobre o paciente.

#### 6.2.1.5 Modelagem de Sensores e Atuadores

Os sensores e atuadores fisicamente pertencem ao domínio mecânico e ao domínio eletrônico. Devido a sua importância no desempenho do produto mecatrônico, será tratado a parte.

Os sensores tem um papel importante no desempenho do produto mecatrônico, sendo responsáveis por sentir as variáveis ou objetos ao longo do cumprimento da trajetória do movimento, transformando essas sensações em sinais elétricos, que são enviados para a unidade de controle, onde ocorre o processamento.

A modelagem dos sensores passa pela localização mais adequada que devem ser posicionados para fornecer todas as informações necessárias ao processamento. Sua localização vai determinar o tempo morto do processamento e isso interferirá no sistema de controle. A base do sistema de controle são as informações oriundas dos sensores. Se forem geradas informações erroneas dos sensores, todo o sistema de controle do produto mecatrônico pode ficar

comprometido. As falhas nos sensores podem acontecer por um defeito ocasionado no próprio sensor, ou devido o seu posicionamento na instalação durante a operação do produto mecatrônico.

O dimensionamento do atuador é impactado pelo torque requerido necessário para a movimentação da plataforma. O torque depende muito do peso do paciente que vai utilizar o dispositivo de transferência. A maioria dos pacientes são pessoas com peso abaixo de 150 kg. Acima desse peso, a frequência de utilização do dispositivo tende a ser reduzida.

Atender a pacientes pesados implica o dimensionamento de um atuador de maior capacidade, além de tornar o dispositivo como um todo mais pesado, o que promove um conflito com outros dois requisitos: ter mobilidade operacional e preço reduzido. Diante disso, e buscando um balanceamento entre os requisitos foi definido limitar a capacidade do dispositivo para paciente até 150 kg. Uma vez testado o produto e aprovado, a experiência adquirida tornará mais viável o desafio de desenvolvimento do produto para pacientes pesados, mantendo a mobilidade operacional e preço reduzido.

Essa modelagem proposta pelo CPCPM permite identificar as subfunções em todos os domínios da mecatrônica proporcionando uma sinergia entre os especialistas envolvidos, para o conhecimento das especificidades de cada domínio. Além disso, possibilita que se retorne ao início da modelagem para fazer ajustes necessários e, conseqüentemente, corrigindo ao longo do processo de forma a manter uma linha completa de raciocínio no desenvolvimento do produto mecatrônico. Contudo, as informações levantadas estão fragmentadas, sendo necessário consolidá-las em um modelo funcional único, contemplando todos os domínios da mecatrônica.

### **6.2.2 Modelo Funcional do Produto Mecatrônico**

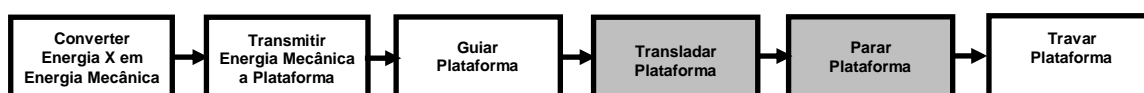
A maioria das subfunções foi identificada ao longo da modelagem nos domínios da mecatrônica abordada no ítem anterior. O trabalho a ser desenvolvido agora é a consolidação delas em um único modelo que represente a funcionalidade do produto mecatrônico em sinergia com todos os seus domínios.

No diagrama de classe, foram identificados dois objetos que desenvolvem uma trajetória de movimento para atender à função global: a “*Plataforma*” e a “*Esteira*”. Essas trajetórias, como definido anteriormente, vão ser controladas pelo sistema mecatrônico.

A plataforma executa um movimento de translação na direção vertical e horizontal. Para acontecer esse movimento é necessário que o seu deslocamento seja guiado para garantir um movimento retilíneo. Esse movimento necessita de uma fonte de energia mecânica, responsável por vencer as forças de atrito e o momento de inércia. As fontes de energia disponíveis podem ser elétrica, hidráulica, pneumática, etc. Portanto, é necessário uma função que converta energia X em energia mecânica, sendo X uma das formas de fonte energia escolhidas.

Atendendo a um dos requisitos do modelo caixa-preta, deve ser inserido uma função que determine o travamento desse movimento. Diante dessas explicações, o modelo funcional (figura 44), específico desse movimento, pode ser representado por uma cadeia sequencial de subfunções.

Figura 44 – Modelo funcional específico



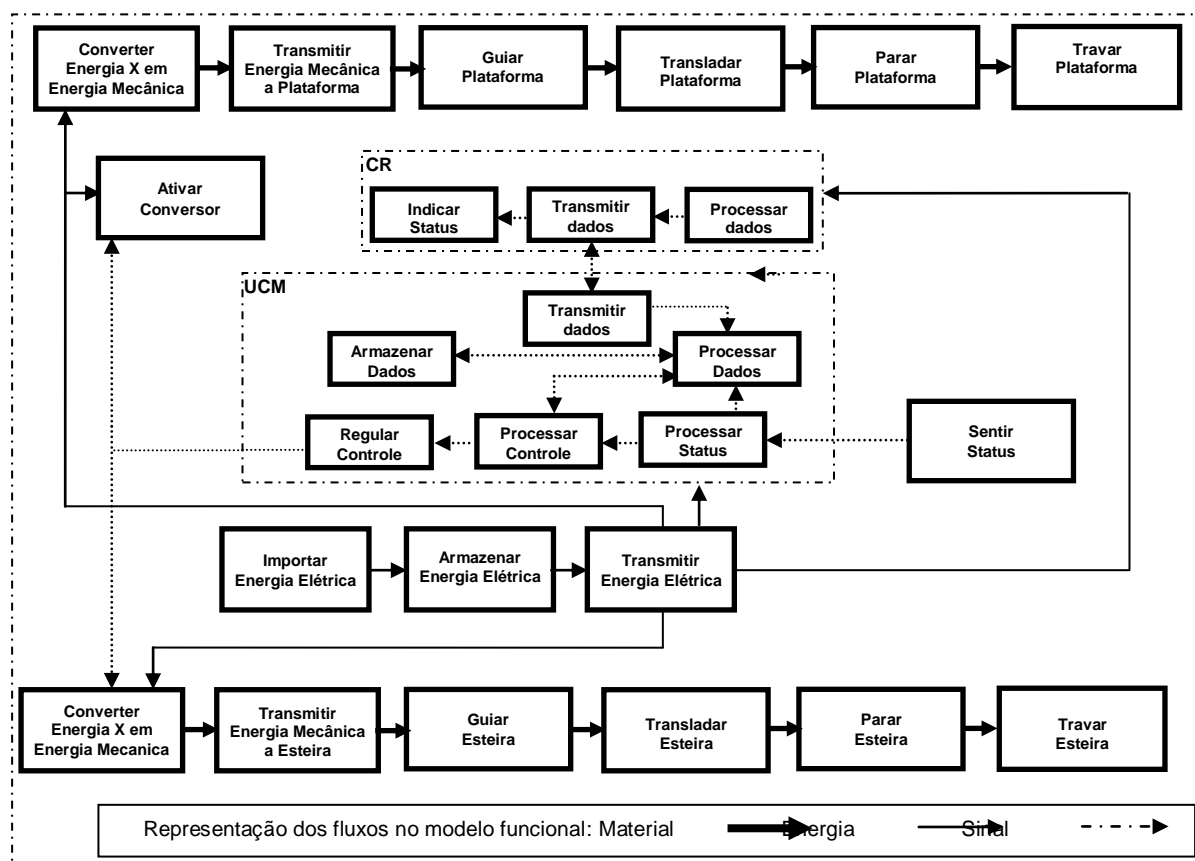
Fonte: (SANTANA, 2011)

O modelo específico para o objeto esteira é semelhante ao representado na figura 44, com o detalhe que o movimento é de rotação em vez de translação. Aliás, as duas subfunções destacadas em cinza são inseridas no modelo para distinguir peculiaridades e ações do movimento nesse nível de abstração. A subfunção “*Transladar Plataforma*” e “*Rotacionar Esteira*” estão definindo o tipo de movimento funcional e a ação, ou seja, o objeto está em movimento, o que acontece quando a energia mecânica é fornecida pelo conversor. Da mesma forma a subfunção “*Parar Plataforma*” ou “*Parar Esteira*”, determinam que o movimento foi cessado, ou seja, a energia mecânica fornecida pelo conversor foi interrompida.

Como se verifica, o modelo funcional é elaborado com base nas informações levantadas durante a modelagem em cada domínio da mecatrônica e seguindo os requisitos definidos no modelo caixa-preta. No modelo funcional do dispositivo de transferência de paciente (figura 45) as subfunções do Controle Remoto (CR) e Unidade de Controle Mecatrônica (UCM) estão agrupadas em caixas pontilhadas para destacar que são subfunções desses dois objetos que foram identificados no diagrama de classes.

A subfunção “*Processar Status*” representa o FB “CTUD”, enquanto “*Processar Controle*” o FB “ATUADOR”. O FB “VEL” está representado pela subfunção “*Regular Controle*”. Finalmente, todo o sistema necessita do suprimento de energia elétrica para o seu funcionamento. A subfunção “*Importar Energia Elétrica*” representa a energia fornecida externa a fronteira do dispositivo, por exemplo, a energia da rede elétrica do ambiente em que está inserido o dispositivo. Essa energia é armazenada e vai suprir as necessidades do sistema mecatrônico.

Figura 45– Modelo funcional do produto mecatrônico



Fonte: (SANTANA, 2011)



Para a construção das alternativas de projeto, a partir do modelo funcional, são selecionadas aquelas subfunções que têm maior impacto no produto mecatrônico em conformidade com as necessidades dos clientes. Normalmente, são selecionadas dez subfunções para elaboração dos princípios de solução para o projeto em desenvolvimento. O quadro 16 apresenta as subfunções selecionadas com esse propósito.

Quadro 16 – Subfunções do modelo funcional

SUBFUNÇÕES	SUBFUNÇÕES
Armazenar Energia Elétrica	Processar Controle
Converter Energia X em Energia Mecânica	Armazenar Dados
Transmitir Energia Mecânica	Transmitir Dados
Ativar Conversor	Guiar Esteira
Guia Plataforma	Travar Esteira
Travar Plataforma	Energia X
Sentir Status	

Fonte: (SANTANA, 2011)

### 6.2.3 Construção das Alternativas de Projeto

A seleção das alternativas de projeto é sistematizada através da construção da matriz morfológica (figura 46) a partir do modelo funcional elaborado, ou seja, para cada subfunção do quadro 15, são identificados os componentes capazes de atender a operação dessa subfunção.

Por exemplo, para atender a subfunção “*Sentir Status*”, têm-se como opções sensores de proximidade tipo indutivo, capacitivo ou fotoelétrico, e sensores de deslocamento tipo potenciômetro, transformador diferencial (LDTV) e encoder. Deve-se enfatizar que aumentam as possibilidades de se encontrar soluções mais adequadas, se mais componentes disponíveis forem oferecidos para cada subfunção. Nessa matriz, os componentes estão agrupados de acordo com o número correspondente da subfunção. Por exemplo, os componentes disponíveis para atender a quarta subfunção estão agrupados no número “4” indicado na matriz.

Figura 46 – Matriz morfológica do produto mecatrônico

MATRIZ MORFOLÓGICA										
FUNÇÃO	1	2	3 e 6	4 e 6	5	6	7	8, 9, 10	9	10
	Bateria ácido-chumbo Bateria Ni-Cd?Ag-Zn Bateria Saca	Motor elétrico ac Motor elétrico dc Motor Servo	Engrenagem Embreagem Fricção Embreagem Magnética Eixo Fuso Cardan Solenóide Relay <i>Feed</i> Relay Polarizado		Mancal de deslizamento Rclamento Estera Rclamento Rolos Galia	<i>Interruptor Pushbutton</i> <i>Interruptor Rotativo</i> <i>Interruptor Toggle</i> Garra Relay Híbrido Relé Tratamento Relé Uso Geral Sensor Indutivo Sensor Capacitivo Sensor Fotoelétrico Sensor Potenciômetro Sensor LVDT Encoder Sensor Ultrassônico Processador 0 Bits Processador 16 Bits Processador 32 Bits PCB_Simples PCB_Multicamada Chip PLC		Microcomputador (CPU) Memória M < 16 kbits 16 < Memória < 32 kbits 64 < Memória < 256 kbits Memória Disco Bluetooth Rádio Wireless		
1 Armazenar energia	■									
2 Converter EE em Energ. Mecânica		■								
3 Transmitir Energia Mecânica			■	■						
4 Ativar Atuador				■						
5 Guiar Plataforma					■	■				
6 Travar Plataforma				■		■	■			
7 Sentir Status							■	■		
8 Processar Controle								■	■	
9 Armazenar Dados									■	■
10 Transmitir Dados										■

Fonte: (SANTANA, 2011)

Na seleção de componentes, procura-se identificar aqueles que têm maior impacto no desempenho do produto mecatrônico como um todo. Por exemplo, a subfunção “*Guiar Plataforma*” tem como objetivo direcionar o movimento linear de translação da plataforma, seja ele vertical ou horizontal. Como detalhado no apêndice C, modelagem no domínio mecânico, se a guia tiver folga excessiva durante o movimento de translação, pode ocorrer níveis elevados de vibração, contrariando um dos requisitos técnicos do produto. Por outro lado, se ocorrer ajustes apertados, um torque maior pode ser gerado pelas forças de atritos exageradas, contrariando também outro requisito técnico.

A análise foi seguida para as demais subfunções, e é evidente que a experiência do projetista conta muito. Por outro lado, uma vez construído o banco de dados, qualquer projetista, mesmo com pouca experiência, poderá utilizar a matriz morfológica para selecionar subfunções de seu modelo funcional que terá um desempenho satisfatório, no nível do projetista experiente. O banco de dados cada vez mais elimina as especificidades “paradigma” individual de cada projetista, buscando verdadeiramente um projeto criativo em uma sinergia de todos os projetistas. Desse modo, os componentes, ilustrados na figura 46, foram eleitos para representar a construção da matriz morfológica.

### 6.3 AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE NO PROJETO CONCEITUAL

Com base nos componentes identificados na matriz morfológica, são construídas as matrizes componente - falha, que identifica os modos de falhas em potencial de cada componente e, componente – custo, que identifica a estimativa de preço de cada componente.

#### 6.3.1 Matriz Componente - Falha

Para cada componente identificado na matriz morfológica apresentada na figura 46, são levantados os modos de falhas funcionais em potencial, que vão compor a matriz componente - falha (figura 47).



Os modos de falhas funcionais em potencial são falhas experimentadas por componentes existentes que têm uma similaridade funcional com as subfunções que vão operar o fluxo do modelo funcional.

Esses modos de falhas foram obtidos através de informações extraídas do *Repository Design, Reliability Prediction of Electronic Equipment, Reliability Maintainability and Risk e Fundamentals and Applications*. Também experiências anteriores do projetista. No apêndice F estão detalhados todos os modos de falhas funcionais em potencial ilustrado na figura 47.

Existem alguns componentes que, na verdade, constituem um subconjunto de componentes (*subassembly*). Por exemplo, uma placa de circuito impresso é formada de vários componentes, tais como microcontroladores, resistores, capacitores, etc. Considera-se os modos de falhas dos componentes que podem ser modificados pelos fatores ambientais, ignorando os demais por ser considerado insignificante a sua contribuição no valor da taxa de falha.

Na medida que novos modos de falhas são inseridos na matriz, é formado um banco de dados de falhas de componentes, o que diminui o tempo de elaboração da matriz e, por conseguinte, a análise de confiabilidade, tornando o método proposto muito atrativo.

Na avaliação dos modos de falhas levando em consideração o Número Prioridade (NP), basta substituir o “1” na matriz componente – falha (figura 46), pelo valor correspondente do NP. No apêndice F está inserida essa matriz e o cálculo do número prioridade.

### **6.3.2 Matriz Componente - Custo**

A estimativa de preço foi obtida pela consulta a componentes similares no mercado e a experiência vivenciada pelo projetista. Na matriz componente – custo (figura 48) são estimados os custos de todos os componentes relacionados na matriz morfológica (figura 46). Por exemplo, o custo de uma bateria de ácido\_chumbo foi estimado o valor de R\$ 90,00. Do mesmo modo a estimativa para um sensor capacitivo foi de R\$ 190,00. Como os preços ao longo do tempo variam a depender de fatores econômicos mundiais, é recomendável a atualização dos preços com uma certa frequência.

Figura 48 – Matriz componente - custo

Bateria ácido_chumbo	90
Bateria Ni_Cd/Ag_Zn	130
Bateria Seca	140
Motor Elétrico Ac	140
Motor Elétrico dc	160
Motor Servo	220
Motor de Partida	250
Motor de Passo	160
Correia	75
Engrenagem	150
Embreagem Fricção	550
Embreagem Magnética	1300
Eixo	250
Fuso	450
Cardan	250
Solenóide	40
Relé Reed	80
Relé Polarizado	70
Bucha	60
Rolamento de Esfera	180
Rolamento de Rolos	150
Guia	70
Switch PushBotton	50
Switch Rotativo	70
Switch Toggle	60
Garra	240
Relé Híbrido	80
Relé Travamento	60
Relé Uso Geral	40
Sensor Indutivo	200
Sensor Capacitivo	190
Sensor Fotoelétrico	80
Sensor Potenciometro	150
Transformador Diferencial LVDT	170
Encoder	190
Sensor Ultrassônico	1600
Processador 8 bits	100
Processador 16 bits	120
Processador 32 bits	140
PCB_Simples	230
PCB_Multicamada	350
Chip	120
PLC	3000
Microcomputador(CPU)	2500
Memória M < 16 kbits	120
16 < Memória < 32 kbits	140
64 < Memória < 256 kbits	160
Memória Disco	80
Bluetooth	75
Rádio	30
Wireless	195

Fonte: (SANTANA, 2011)

### 6.3.3 Seleção de Conceitos

Nesse exemplo, foram selecionados três conceitos para avaliar o método proposto. O **conceito\_2** está ilustrado na figura 49.



Como pode ser observado, o conceito é uma combinação de componentes que vão formar a arquitetura do produto e pelo método proposto pode ser avaliado de forma simples e rápida para a tomada de decisão.

A matriz Função – Falha (FF) do **conceito\_2** foi obtida pela multiplicação da “matriz morfológica do **conceito\_2**” pela “matriz Componente – Falha”. De forma semelhante foi obtida a matriz Função – Custo (FC), ou seja, multiplicando a *matriz morfológica do conceito\_2* pela “matriz Componente – Custo”. Os resultados dos três conceitos selecionados estão ilustrados na figura 50.

Figura 50 – Resumo dos conceitos selecionados (quantidade de falhas)

AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE - QTE FALHAS FUNCIONAIS							
	FUNÇÃO	Conceito 1		Conceito 2		Conceito 3	
		Falha(Qte)	Custo	Falha(Qte)	Custo	Falha(Qte)	Custo
1	Armazenar energia	2	90	2	130	2	140
2	Converter EE em Energ. Mecânica	2	140	2	160	2	160
3	Transmitir Energia Mecânica	3	325	6	600	4	800
4	Ativar Atuador	3	40	2	70	2	80
5	Guiar Plataforma	4	130	6	250	6	220
6	Travar Plataforma	2	50	2	70	1	60
7	Sentir Status	2	350	4	380	2	250
8	Processar Controle	8	450	8	590	8	490
9	Armazenar Dados	8	470	8	610	8	510
#	Transmitir Dados	1	75	2	30	1	195
		35	2120	42	2890	36	2905

Fonte: (SANTANA, 2011)

Analisando os dados apresentados, concluímos que a escolha dos conceitos tendem a apresentar resultados diferentes. Por exemplo, o **conceito\_1** apresentou menor incidência de falhas a um custo menor, enquanto o **conceito\_2** foi o que apresentou maior incidência de falhas, embora seu custo seja menor do que o do **conceito\_3** que apresentou bem menos falhas.

Portanto, o método proposto, possibilita, de uma forma bastante simples, avaliar a confiabilidade dos conceitos selecionados. Nesse exemplo, o **conceito\_2** deve ser descartado uma vez que os conceitos “1” e “2” mostraram-se mais viáveis quanto a confiabilidade. Avaliando o custo entre esses dois conceitos, pode ser concluído que o conceito “1” apresenta maior viabilidade. Entretanto, o método CPCPM permite que novos conceitos sejam selecionados de tal forma que esse



processo de refinamento, com certeza, possibilita encontrar conceitos que ofereçam maior confiabilidade.

Os resultados dos três conceitos considerando o Número Prioridade estão ilustrados na figura 51.

Figura 51 – Resumos dos conceitos selecionado (número prioridade)

AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE - NÚMERO PRIORIDADE							
	FUNÇÃO	Conceito 1		Conceito 2		Conceito 3	
		Falha(NP)	Custo	Falha(NP)	Custo	Falha(NP)	Custo
1	Armazenar energia	12	90	12	130	12	140
2	Converter EE em Energ. Mecânica	4	140	4	160	4	160
3	Transmitir Energia Mecânica	18	325	38	600	28	800
4	Ativar Atuador	10	40	8	70	8	80
5	Guiar Plataforma	8	130	34	250	34	220
6	Travar Plataforma	8	50	8	70	4	60
7	Sentir Status	5	350	14	380	8	250
8	Processar Controle	34	450	34	590	34	490
9	Armazenar Dados	34	470	34	610	34	510
#	Transmitir Dados	4	75	5	30	4	195
		137	2120	191	2890	170	2905

Fonte: (SANTANA, 2011)

Na avaliação realizada, considerando o número prioridade, o **conceito\_2** obteve o maior valor de NP entre os três conceitos.

Concluindo, pelo resultado obtido o **conceito\_2** é um conceito não confiável e, portanto, deve ser descartado.

## 7 CONCLUSÃO

A análise de confiabilidade no projeto conceitual de desenvolvimento de produto mecatrônico foi apresentada, revelando que é possível avaliar os aspectos de confiabilidade nessa fase de projeto, altamente abstrata. A análise oferece grandes benefícios para a redução do tempo de desenvolvimento e custos envolvidos no ciclo de vida do produto. Evita a passagem de conceitos selecionados como não confiáveis para a fase seguinte de projeto detalhado. Isso ocasiona perda de tempo dos projetistas no detalhamento de um conceito que já está falho em sua concepção, e gerar altas revisões de projeto com incidência de elevados custos.

O projeto de produto mecatrônico é caracterizado pela necessidade de uma sinergia entre os domínios envolvidos. Afinal, as alterações realizadas em um domínio são capazes de influenciar significativamente os demais. Os domínios da mecatrônica têm suas especificidades e procedimentos para desenvolvimento do projeto, sendo isso uma dificuldade para sua compreensão e entendimento geral.

O método Confiabilidade no Projeto Conceitual de Produtos Mecatrônicos (CPCPM) reúne essas especificidades no projeto conceitual, instituindo uma ferramenta que possibilita o desenvolvimento sinérgico dos domínios da mecatrônica. Como foi abordado no capítulo 6, a elaboração do modelo funcional a partir do modelo caixa-preta, iniciado pela elaboração do modelo abstrato e construção da árvore funcional, atividade típica do domínio mecânico, possibilitou a identificação dos casos de uso da linguagem UML, muito utilizada no domínio de software, propiciando uma ligação entre esses domínios para o desenvolvimento do projeto.

Finalmente, o domínio do controle – muitas vezes, interpretado como uma inclusão no domínio de software – possui suas particularidades que necessitam ser atendidas para que a engenharia de controle possa desempenhar adequadamente o desenvolvimento da lógica de controle, que, com efeito, é fundamental para o desempenho e sucesso do produto mecatrônico.

O método proposto mostrou que a elaboração dos gráficos de estado (*statecharts*) e identificação dos bloco de funções, linguagem de fácil interpretação da engenharia de controle, complementam a sinergia em todos os domínios da mecatrônica na construção do modelo funcional.

A integração de hardware e software é conseguida pelo uso de uma linguagem única, empregada na elaboração do modelo funcional. O uso da base funcional disciplina a elaboração do modelo, evitando que cada um utilize suas peculiaridades e vícios de linguagem. Isso é muito importante, pois permite que o pensamento dos engenheiros dos diversos domínios sejam colocados em uma escrita de fácil compreensão por todos os envolvidos.

Apesar das decisões tomadas no projeto conceitual terem grande influência no desempenho do projeto, de um modo geral é considerado perda de tempo pelos projetistas, principalmente nos domínios da mecânica e software, preferindo-se partir logo para a tomada de decisões junto com o detalhamento do produto.

Tratando-se de um produto mecatrônico essa escolha é crítica. Isso norteou o desenvolvimento do CPCPM com a preocupação em desenvolver uma ferramenta para avaliação da confiabilidade no projeto conceitual que fosse de fácil aplicação e que demandasse um tempo reduzido na sua utilização.

A utilização do método propicia a sistematização do conhecimento existente nos projetistas, formando uma massa crítica que garante a memória técnica para o desenvolvimento do projeto conceitual. Além disso, a formação do banco de dados de repositório de projeto, que acontecerá normalmente com a utilização do método, oferece, como benefício, a redução do tempo de análise da confiabilidade, motivando, com certeza, os projetistas na sua utilização.

Para abordagem dos aspectos de confiabilidade, o CPCPM propôs a análise de falhas funcionais em potencial dos conceitos selecionados na fase de projeto conceitual. Os modos de falha dos componentes que podem formar o conceito são identificados, pela análise do projetista, com base em experiências passadas com componentes similares em termos de funcionalidade.

A formação do banco de dados para cadastramento de componentes de produtos mecatrônicos com dados de falhas funcionais, atuais ou em potencial, por similaridade funcional de componentes, permite a construção rápida e eficiente da matriz morfológica, matriz componente - falha e matriz componente - custo, essenciais para a análise da confiabilidade do método proposto.

O CPCPM poderá ser estruturado em uma ferramenta de base de dados ou em uma planilha em Excel. A construção em planilha Excel permite a sua implementação inicial em um tempo curto, propiciando a formação de uma base de

dados para guarda da memória técnica do projetista. Contudo, ao longo do tempo, com o incremento de uma grande quantidade de dados, é oportuno o desenvolvimento de uma ferramenta de operacionalização dessa base de dados.

O CPCPM constituiu um esforço inicial na elaboração do projeto conceitual de um produto, abrangendo os diferentes domínios da mecatrônica, na busca de uma sinergia entre eles. Também introduziu a avaliação da confiabilidade dos conceitos selecionados possibilitando a melhoria da qualidade na tomada de decisão nessa fase de projeto.

### 7.1 LIMITAÇÃO DO MÉTODO

O método, na sua aplicação, para obter agilidade e rapidez, é dependente da formação de um banco de dados disponível para cadastramento de componentes mecatronicos similares em nível funcional, com o histórico de falhas funcionais em potencial.

O desenvolvimento do banco de dados e procedimentos sistemáticos de cadastramento é essencial para o sucesso do método. Isso possibilitará a reunião e guarda da memória técnica que atualmente acaba sendo diluída no pensamento dos projetista, ou seja:

- a) Experiência dos projetistas
- b) Multidomínio

### 7.2 RECOMENDAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

Visando a complementação do método aqui proposto, são feitas as seguintes recomendações:

- a. Desenvolver um banco de dados para cadastramento das subfunções e componentes similares de produtos mecatrônicos, inserindo nele os modos de falhas de cada componente. Esse banco de dados irá facilitar a construção das matrizes de forma rápida e eficiente;

- b. Desenvolver uma sistemática de resgate de dados de falhas de componentes para formação de uma memória técnica que possibilitará a melhoria das atividades no desenvolvimento do projeto conceitual de produto mecatrônico;
- c. Ampliar e aprofundar os estudos de pesquisa na área de projeto conceitual de produtos mecatrônicos, no intuito de minimizar os custos do ciclo de vida do produto, tornando-os cada vez mais competitivos no mercado globalizado;
- d. Integração do CPCPM no MdpM. O MdpM é uma metodologia abrangente as fases de desenvolvimento de projeto, enquanto o CPCPM é focado na fase de projeto conceitual com inserção da confiabilidade. A integração das duas pode vir a tornar-se uma metodologia de referência no desenvolvimento de projeto de produtos mecatrônicos;
- e. Desenvolvimento de uma ferramenta de software para operacionalização do CPCPM.

## REFERÊNCIAS

- AMEROGEN, J.V.; BREEDVELD, P. ***Modeling of Physical System for the Design and Control of Mechatronic Systems***. Annual Reviews in Control, Enscheda, Netherlands, v. 27, p. 87-117, 2003.
- ARUNAJADAI, S. G.; STONE, R. B.; TURMER, I. Y. ***A Framework for Creating a Function-based Design Tool for Failure Mode Identification***. Trabalho apresentado no ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference – DETC'02, Canadá, 2002.
- AVIZIENIS, A.; LAPRIE, J-C.; RANDELL, B. ***Fundamental Concepts of Dependability***. Newcastle, UK: University of Newcastle, 2001.
- BAXTER, M. ***Projeto de Produto***. São Paulo, Brasil, Editora Blucher, 2008.
- BEHBAHANI, S.; SILVA, C.W. ***Reliability Tradeoffs of a Complex Mechatronic System in the Early Design Stage***. International Journal Manufacturing Research, Vancouver, Canada, v. 2, n. 1, p: 51-72, 2007.
- BONFÉ, M.; FANTUZZI, C. ***Design and Verification of Mechatronic Object-Oriented Models for Industrial Control Systems***. Emerging Technologies and Factory Automation, Lisboa, Portugal, 2003a.
- BONFÉ, M.; FANTUZZI, C. ***Design and Verification of Industrial Logic Controllers with UML and Statecharts***. Control Applications (CCA), IEEE International Conference on, Lisboa, Portugal, 2003b.
- BONFÉ, M.; FANTUZZI, C.; SECCHI, C. ***Behavioral Inheritance in Object-Oriented Models for Mechatronic System***. Int. J. Manufacturing Research, vol. x, No. x, pp.xxx-xxx, Ferrara, Italy, 2007.
- CARCHIA, M. ***Electronic/Electrical Reliability***. Carnegie Mellon University, Pittsburgh, USA, 1999.
- CHU, T. L. et al. ***A Review of Software-Induced Failure Experience***. International Meeting on Nuclear Plant Instrumentation Control and Human Machine Interface Technology, USA, 2006.
- Department of the Army, Headquarters. ***Reliability/Availability of Electrical & Mechanical System for Command, Control, Communications, Computer, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance (C4ISR) Facilities***. Washington, DC, 2007.

DESIGN ENGINEERING LAB, **Repository Design**. Disponível em <http://designengineeringlab.org>. Acesso em 06/10/2011.

DoD – DEPARTMENT OF DEFENSE. *Reliability Prediction of Electronic Equipment*. MIL - HDBK -217F. NOTICE 2, Washington, DC, USA, 1995.

DoD – DEPARTMENT OF DEFENSE. **Military Handbook Electronic Reliability Design Handbook**. MIL- HDBK-338B. Washington, DC, USA, 1998.

DHILLON, B. S. **Design Reliability: Fundamentals and Applications**. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1999.

FENG, S. C.; SONG, E. Y. **Information Modeling of Conceptual Design Integrated with Process Planning**. Trabalho apresentado no Sympósio on Design for Manufacturability International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Orlando, Flórida, USA, 2000.

FRADEN, J. **Handbook of Modern Sensors**. 3. ed, San Diego, USA: Spring, 2004.

FREITAS, R. D. **Análise de Confiabilidade e Segurança de Sistemas Mecatrônicos Altamente Integrados e Complexos**. 2008. 200f. Dissertação (Mestrado em Mecatrônica) - Escola Politécnica e Instituto de Matemática, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2008.

GODDARD, P. L. **Software FMEA Techniques**. Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2000.

GOEL, A.; GRAVES, R.J. **Using Failure Mode Effect Analysis to Increase Electronic Systems Reliability**. New York, USA: Rensselaer Polytechnic Institute, 2007.

HAREL, D. Statecharts: **A Visual Formalism for Complex Systems**. Science of Computer Programming vol. 8 pp: 231-274, 1987.

HARI, A.; WEISS, M. P. **CFMA- An Effective FMEA Tool for Analysis and Selection of the Concept for a New Product**. Trabalho apresentado no ASME Design Engineering Technical Conference, Design Theory and Methodology Conference - DETC99/DTM-8756, Las Vegas, 1999a.

HARI, A., WEISS, M. P. **Failure Mode Analysis in the Concept Stage Eliminates Failure Before they Reach the Customers**. Trabalho apresentado à 12 th International Conference, Las Vegas, 1999b.

HEUSER, B.; WITSCH, D.; KATZKE, U. **Automatic Code Generation from a UML Model to IEC-61131-3 and System Configuration Tools**. International Conference on Control and Automation, Budapest, Hungary, 2005.

HEVERHAGEN, T.; TRACHT, R. **Using Stereotypes of the Unified Modeling Language in Mechatronic Systems**. International Conference on Information Technology in Mechatronics, Istanbul, Turkey, 2001.

HUANG, B., ZHANG, H., LU, M. **Software FMEA Approach Based on Failure Modes Database**. Department of System Engineering, Beihang University, Beijing, China, 2009

IEC- 61131-3 **Programmable Controllers**. International Electrotechnical Commission (IEC), 2003.

IEC-61499-1 **Functions Blocks**. International Electrotechnical Commission (IEC), 2005.

ISERMANN, R. **Mechatronic Systems: Concepts and Applications**. Transactions of the Institute of Measurement and Control, Germany, v. 22, n. 1, p. 29-55, 2000.

MASCARENHAS, A.P.F.M. **Metodologia para Desenvolvimento de Produtos Mecatrônicos Integrando Engenharia de Software e Engenharia de Produtos**. 2007. 183 f. Dissertação (Mestrado em Mecatrônica) - Escola Politécnica e Instituto de Matemática, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2007.

ONWUBOLU, G. C. **Mechatronics Principles and Applications**. São Paulo: Elsevier, 2005.

KORSAH, K., MUHLHEIM, M. D., HOLCOMB, D. E. **Industry Survey of Digital I&C Failures**. Department of Energy the USA, 2006.

ORMON, S.W.; CASSADY, C.R.; GREENWOOD, A.G. **A Simulation-based Reliability Prediction Model for Conceptual Design**. Trabalho apresentado ao Annual Reliability and Maintainability Symposium, Philadelphia, USA, 2001.

PAHL, G. et al. **Projeto na Engenharia**. São Paulo: Blucher, 2005.

ROTONDARO, R. G., MIGUEL, P. A. C., GOMES, L. A. V. **Projeto do Produto e do Processo**. São Paulo : Editora Atlas, 2010.

ROSENFELD, F. A. et al. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos**. São Paulo: Editora Saraiva, 2006.



SANTANA, J. A. S.; LEPIKSON, H. A. **Confiabilidade de Produto Mecatrônico em Projeto Conceitual**. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 5º. 2008, Salvador. Resumos. Salvador: UFBA, 2008. CON08-0297, v. 1, p. 234.

SECCHI, C.; BONFE, M.; FANTUZZI, C. **On the Use of UML for Modeling Mechatronic Systems**. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, vol.4 No. 1, Seattle, USA, 2007.

SILVA, A. **UML 2.0 do Requisito à Solução**. São Paulo, Editora Érica, 2010

SMITH, J.; CLARKSON, P.J. **Design Concept Modelling to Improve Reliability**. Journal of Engineering Design, Cambridge, UK, v. 16, n. 5, p. 473-492, 2005.

SMITH DAVID. **Reliability Maintainability and Risk**. United Kingdom, Elsevier, 2005

STONE, R.B., TUMER, I.Y., WIE, M.V. **The Function-Failure Design Method**. Trabalho apresentado à International Design Engineering Technical Conference, Design Theory and Methodology Conference, Washington, DC, USA, 2003.

STRAWBRIDGE. Z.; McADAMS, D. A.; STONE, R. B. **A Computational Approach to Conceptual Design**. Trabalho apresentado à ASME Design Engineering Technical Conference, Montreal, Canadá, 2002.

THRAMBOULIDIS, K. **Model-Integrated Mechatronics – Toward a New Paradigm in the Development of Manufacturing Systems**. Journal of the Industrial Electronics, IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 1, no 1, February, 2005.

THRAMBOULIDIS, K.; PERDIKIS, D.; KANTAS, S. **Model Driven Development of Distributed Control Applications**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 33, pp:233-242, 2007.

TRANORIS, C.; THAMBOULIDIS, K. **Integrating UML and the Function Block Concept for the Development of Distributed Control Applications**. IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Lisboa, Portugal, 2003.