

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

**SISTEMATIZAÇÃO DO PROCESSO DE PROJETO EM AUTOMAÇÃO DE  
MÁQUINAS CARTEZIANAS COM ACIONAMENTO ELETROMECAÂNICO-ÊNFASE  
NO POSICIONAMENTO**

Dissertação submetida à  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

Para Obtenção do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**JAVIER ANDRÉS RECKMANN BERTRÁN**

Florianópolis-SC, Novembro de 2009

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

**SISTEMATIZAÇÃO DO PROCESSO DE PROJETO EM AUTOMAÇÃO DE  
MÁQUINAS CARTEZIANAS COM ACIONAMENTO ELETROMECAÂNICO -ÊNFASE  
NO POSICIONAMENTO**

**JAVIER ANDRÉS RECKMANN BERTRÁN**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

**MESTRE EM ENGENHARIA  
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA**

Sendo aprovada em sua forma final

\_\_\_\_\_  
Prof. Carlos Alberto Martin, Dr. Eng.- Orientador

\_\_\_\_\_  
Prof. André Ogliari, Dr. Eng. - Co-Orientador

\_\_\_\_\_  
Prof. Eduardo Alberto Fancello, Dr. Sc.- Coordenador do Curso

**BANCA EXAMINADORA**

\_\_\_\_\_  
Prof. Víctor Juliano De Negri, Dr. Eng.

\_\_\_\_\_  
Prof. David Pimentel Burgoa Dr. Eng.

\_\_\_\_\_  
Prof. Marcelo Gitirana Gomes Dr. Eng.

Dedicado a la familia Bertrán Jeria, en especial a mi madre María Verónica Bertrán Jeria y a mi abuela Rosa Jeria Ester Llantén (in memoriam) por su eterno apoyo y confianza en mí, y a mi amigo Daniel Eduardo Sánchez Ibáñez por su orientación y apoyo en la realización de esta linda iniciativa y en los momentos difíciles.

## AGRADECIMENTOS

Ao professor Carlos Alberto Martin, orientador desta pesquisa, por seus ensinamentos, paciência, dedicação e principalmente por seus valores humanos e profissionais entregados.

Ao professor André Ogliari, co-orientador desta pesquisa, pela sua contribuição à dissertação, seus ensinamentos entregados e pelo seu impecável profissionalismo.

A meus colegas da Engenharia mecânica, Daniel Ponce, Claudio Ponce, Frank Ajata, David Pimentel, Rogério Lambert, Victor Heredia, Antonio Dourado, Mario Gonzalez, Marcelo Bustamante, Fabricio Brasil e Dona Maria pelo compartilhamento de conhecimento e experiências e sua amizade.

À instituição UFSC e ao Brasil, por ter-me proporcionado a oportunidade de estudar e pesquisar em uma instituição pública de excelência e por ter-me acolhido como um brasileiro mais.

Ao CNPq, que financiou este trabalho tornando possível a realização desta pesquisa.

A todos meus amigos conhecidos no Brasil; Juanito, Chilo, Chechu, Dante, Pablo B. Pablo Che, Sele, Silvina, Nestor, Silvana, Nazário (Argentina) - Debora, Maxi, Mono, Paulo (Chile) - Célio, Maneca, Jossy, João, Adrelena, Carolina, Eleonora, Cola corta, Onete, Gibson (Brasil) - Lucia, Franco (Uruguai) - Edith, Cesar, Samuel (Pollo), Clari (Paraguai), Joe (Peru), Yader, Gordo, Camilo (Colômbia) - Serieke (Holanda)- Antonin, Fanny (França) - Helder (Cabo verde) - em especial a minha futura esposa Claudine Etavard (Alemanha).

A todos os professores e trabalhadores do POSMEC e a todos os que contribuíram de uma ou outra forma na superação deste desafio

## RESUMO

A sistematização proposta é uma tentativa para disponibilizar procedimentos organizados que permitam desenvolver projetos de máquinas automatizadas novas e projetos de melhoramento em máquinas existentes, com ênfase em posicionamento, desde a identificação das necessidades do cliente até a modelagem e simulação da concepção de máquina. Esta sistematização resulta da análise de um conjunto de trabalhos de pesquisa e desenvolvimento realizados ao longo de mais de duas décadas no Laboratório de Hardware (LHW/UFSC) relacionados com procedimentos utilizados para desenvolver projetos de automação de máquinas (com posicionamento eletromecânico/eletrônico) aos quais foi adaptada uma metodologia específica, derivada da metodologia de projeto de produtos industriais em desenvolvimento no Núcleo de Desenvolvimento do Produto do (NEDIP/UFSC).

A sistemática proposta nesse trabalho visa oferecer aos projetistas procedimentos, métodos e ferramentas para o desenvolvimento de projetos de Automação de Máquinas, facilitando o melhor entendimento global do problema, maior segurança na escolha das concepções alternativas, considerando critérios técnicos e econômicos, entre outros.

Visa-se potencializar o processo de projeto em automação de máquinas de modo que, nas fases de projeto detalhado e de implementação, reduzam-se as mudanças necessárias, causadoras de ônus e atrasos ao projeto.

A sistemática proposta é constituída por doze atividades, as quais permitirão projetar uma máquina automatizada, começando desde a criação da uma idéia de máquina até a modelagem e simulação de uma concepção definitiva para o projeto. Ela permite desenvolver as especificações do projeto, criar concepções alternativas para a estrutura e os componentes da máquina, dimensionar os acionamentos, analisar financeira e economicamente a aquisição da máquina e determinar a escolha das concepções de máquinas adequadas por meio de procedimentos de avaliação.

A sistemática proposta foi avaliada por meio da aplicação de suas diretrizes no desenvolvimento de um eixo de movimento translativo para uma máquina laser para corte de chapas. A aplicação demonstra as vantagens da sistemática apresentada, comparado ao desenvolvimento convencional..

## ABSTRACT

The present systematization is an attempt to provide more organized proceedings allowing to create specifically projects of both new automated machines or improvements of already existing machines, focussing on the positioning. It embraces all steps from indentifying the clients necessities to modulating and simulating a draft design.

This systematization is the result of selected researches effectuated by the LHW (Laboratório de Hardware), related to proceedings utilized for the development of automated machines projects with electro-mechanical/electrical positioning -, that was adapted a specific methodology, derivated from the methodology of projects for industrial products, created by NeDIP (Núcleo de Desenvolvimento de Produto of the EMC/UFSC).

The systematization proposed in this dissertation wants to offer the product engineer proceedings, methods and tools for the creation of designs for automated machines, providing a global view of the problem and more security in choosing alternative solutions, taking into consideration - among others - technical and economical criteria.

The aim is to improve the process of machine automation projects, so that in detailed project and implementation phases necessary changes, causing onus and delay, can be reduced.

The present systematization is composed by twelve activities, permitting the engineer to design an automated machine, beginning at the creation of an idea of a machine, attaining the simulation of a concrete project concept. It allows to process the project's specifications, research alternative solutions for machine component structures, dimension the drive, analyze the acquisition of the machine financial- and economically and determine the adequate choice of solutions by methods of evaluation.

The present systematization was evaluated by applying its guidelines to the development of a translation movement axle for steel cutting. The application demonstrates the advantages of the.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Estrutura da dissertação .....	3
Figura 2.1 - Máquinas multifuncionais (A) máquina multifuncional recente (B) máquina multifuncional clássica (adaptado de Moriwaki, 2008).....	7
Figura 2.2 - Modelo V - processo de modelo de para projetos de sistemas mecatrônicos (adaptado de Neugebauer, Denkena & Wegener, 2007).....	8
Figura 2.3 - Concepção de máquina de um conjunto impressor (adaptado de Burgoa, 2004).....	9
Figura 2.4 - Subsistemas que compõem uma máquina automatizada.....	12
Figura 2.5 - Interação dos subsistemas que compõem uma máquina automatizada. ....	13
Figura 2.6 - Diagrama de blocos do subsistema comando/controle.....	13
Figura 2.7 - Tipos de implementação de comandos/controle .....	15
Figura 2.8 - Classificação dos motores elétricos rotativos (adaptado de Burgoa, 1996) .....	23
Figura 2.9 - Esquema simplificado de alguns tipos de construtivos de motores (adaptado de Burgoa, 1996) .....	24
Figura 2.10 - Classificação dos <i>drivers</i> . ....	26
Figura 2.11 - Curvas características estáticas do atrito em guias e mancais (adaptado de GROSS, 1983) .....	29
Figura 2.12 - Classificação das guias/mancais para projetos de automação de máquinas .....	30
Figura 2.13 - Classificação das transmissões mecânicas. ....	31
Figura 2.14 - Tipos de desalinhamento entre eixos.....	32
Figura 2.15 - Classificação dos acoplamentos .....	33
Figura 2.16 - Classificação dos sensores para automação de máquinas .....	35
Figura 3.1 - Macro-fases e fases do processo de desenvolvimento de produto (adaptado de Romano, 2003). ....	39
Figura 3.2 - Etapas do planejamento da inovação de produtos (adaptado de Leonel, 2006).....	41
Figura 3.3 - Estrutura de funções.....	44
Figura 4.1 - Estrutura de atividades da sistemática para projetos de automação de máquinas. ....	49
Figura 4.2 - Entradas e saídas das informações principais da fase I - planejamento de produto.....	50
Figura 4.3 - Fluxo das tarefas da atividade 1.2.....	51
Figura 4.4 - Esquemática de uma idéia de uma máquina automatizada (fresadora). ....	53
Figura 4.5 - Diagrama de blocos de uma máquina automatizada (fresadora). ....	53
Figura 4.6 - Entradas e saídas das informações principais da fase II - projeto informacional .....	55
Figura 4.7 - Fluxo das tarefas da atividade 2.1.....	55
Figura 4.8 - Calculadora para obter a velocidade de corte de uma máquina laser. ....	56
Figura 4.9 - Dimensões da área de trabalho de uma máquina laser.....	57
Figura 4.10 - Percurso para atingir a velocidade de trabalho. ....	57
Figura 4.11 - Ramificação das especificações indispensáveis para o projeto .....	58
Figura 4.12 - Lista de especificações dinâmicas mais comuns em projeto de automação de máquinas. ....	58

Figura 4.13 - Fluxo das tarefas da atividade 2.2.....	60
Figura 4.14 - Desdobramento de uma máquina automatiza.....	61
Figura 4.15 - Componentes que compõem o eixo da máquina e a inter-relação funcional .....	62
Figura 4.16 - Componentes desenhados em <i>Solidworks</i> .....	63
Figura 4.17 - Entradas e saídas das informações principais da fase III - projeto conceitual.....	64
Figura 4.18 - Fluxos das tarefas da atividade 3.1.....	65
Figura 4.19 - Concepções de estruturas para a máquina. Fonte: Autor.....	66
Figura 4.20 - Alternativas para posicionar uma transmissão (adaptado de Sandin, 2003).....	67
Figura 4.21 - Fluxo das tarefas da atividade 3.2.....	69
Figura 4.22 - Função global da máquina decomposta nas funções globais de cada um dos eixos e decomposição do eixo Y em funções parciais. ....	70
Figura 4.23 - Classificação das guias com elementos rolantes.....	71
Figura 4.24 - Fluxo das tarefas da atividade 3.3.....	75
Figura 4.25 - Matriz morfológica para adotar os componentes a um eixo.....	76
Figura 4.26 - Exemplo da análise de compatibilidade de uma máquina laser. ....	77
Figura 4.27 - Fluxos das tarefas da atividade 3.4.....	77
Figura 4.28 - Desenho do eixo de uma máquina de usinagem com um sistema de transmissão conversora e transformadora .....	79
Figura 4.29 - Passos de avaliação dos acionamentos em relação do torque. ....	82
Figura 4.30 - Fluxo de passos que devem considerados na escolha do comando/controle.....	83
Figura 4.31 - Fluxos das tarefas da atividade 3.5.....	85
Figura 4.32 - Fluxo das tarefas da atividade 3.6.....	88
Figura 4.33 - Valorização dos critérios qualitativos .....	91
Figura 4.34 - Entrada e saída das informações principais da fase IV- projeto preliminar. ....	92
Figura 4.35 - Fluxo de tarefas da atividade 4.1.....	93
Figura 4.36 - Exemplo de circuito mecânico com duas partes separadas por conversor. ....	94
Figura 4.37 - Fonte de corrente elétrica, grandeza de um ponto.....	94
Figura 4.38 - Elasticidade conectada em serie devido a sua dependência a duas velocidades distintas. ....	95
Figura 4.39 - Atrito rotativo (b3) sob um torque (M7) e sob uma velocidade angular (w2). ....	95
Figura 4.40 - Malha constituída de três velocidades distintas (v1, v2 e v3) .....	96
Figura 4.41 - Exemplo de modelo de diagrama de blocos (formal).....	96
Figura 4.42 - Fluxo de tarefas da atividade 4.2.....	97
Figura 4.43 - Diagrama de blocos em linguagem para simulação com Simulink.....	98
Figura 5.1 - Idéias de máquinas laser descartadas.....	100
Figura 5.2 - Esquematisação da idéia de máquina laser.....	101
Figura 5.3 - Idéia de máquina laser representada em um diagrama de blocos. ....	101
Figura 5.4 - Altura mínima para posicionar o cabeçote laser. ....	102
Figura 5.5 - Percurso segundo o eixo X para o posicionador atingir a velocidade de trabalho na qual se realiza o corte. ....	103

Figura 5.6 - Concepções de estruturas para uma máquina laser.....	106
Figura 5.7 - Síntese funcional do eixo X para a máquina laser. ....	107
Figura 5.8 - Matriz morfológica com alternativas para alocar os componentes sobre a estrutura da máquina laser.....	110
Figura 5.9 - Concepção de máquina E1. ....	111
Figura 5.10 - Concepção de máquina E2. ....	111
Figura 5.11 - Modelo do eixo X em circuito eletromecânico generalizado .....	119
Figura 5.12 - Modelo dinâmico em diagrama de bloco (formal) parte do eixo X. ....	122
Figura 5.13 - Modelo dinâmico do eixo X implementado como diagrama de programação para Simulink de MatLab.....	122
Figura 5.14 - Simulação do eixo X com realimentação de velocidade e um controlador tipo P.....	123
Figura 6.1 Desdobramentos dos subsistemas que compõem uma máquina automatizada para um sistema especialista .....	127

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classificação dos tipos de projetos para máquinas automatizadas .....	11
Tabela 2.2 - Classificação das guias com elementos rolantes, segundo sua forma construtiva e suas restrições (adaptado de STOETERAU, 1999) .....	36
Tabela 3.1 - Atributos típicos de produtos industriais (adaptado de Fonseca, 2000).....	43
Tabela 3.2 - Métodos de geração de concepções .....	44
Tabela 4.1 - Exemplo de lista de especificações dinâmicas para um projeto de automação de máquina.....	59
Tabela 4.2 - Exemplo de lista de especificações básicas e do ciclo de vida para um projeto de automação de máquina .....	60
Tabela 4.3 - Dados técnicos dos componentes que compõem o eixo da máquina. ....	63
Tabela 4.4 - Avaliação e seleção das concepções de estrutura.....	67
Tabela 4.5 - Exemplo de avaliação entre concepções de estruturas “método Pugh”.....	68
Tabela 4.6 - Lista das funções comuns em máquinas automatizadas. ....	70
Tabela 4.7 - Exemplo da utilização do método de listagem de atributos.....	72
Tabela 4.8 - Exemplo da avaliação das famílias de guias para o projeto.....	73
Tabela 4.9 - Matriz morfológica com de soluções para o eixo de uma máquina.....	73
Tabela 4.10 - Equações para calcular torque necessário para vencer o atrito no sistema (baseado em Gross,1983).....	79
Tabela 4.11 - Equações para somar os torques necessários para vencer o atrito no sistema (baseado em Gross, 1983).....	80
Tabela 4.12 - Equações calcular o torque necessário para vencer a forças de usinagem e para a somatória de torques total (baseado em Gross, 1983).....	80
Tabela 4.13 - Equações para calcular e somar as inércias e massas do sistema. ....	80
Tabela 4.14 - Equações para calcular o torque necessário para o regime transitório da máquina. ....	81
Tabela 4.15 - Avaliação das alternativas do subsistema comando/controle disponível no mercado...	83
Tabela 4.16 - Exemplo de lista dos custos de aquisição da estrutura para a máquina.....	85
Tabela 4.17 - Exemplo de lista dos custos de aquisição dos componentes que compõem os subsistemas da máquina.....	86
Tabela 4.18 - Comparativo de custos entre duas concepções de máquinas. ....	87
Tabela 4.19 - Critérios generalizados para projetos de automação de máquinas. ....	89
Tabela 4.20 - Matriz de avaliação por comparação dos pesos dos critérios de seleção (adaptada de Back <i>et al.</i> , 2008). ....	90
Tabela 4.21 - Valoração dos critérios quantitativos. ....	91
Tabela 4.22 - Determinação do valor de utilidade das concepções de máquina. ....	92
Tabela 5.1 - Especificações dinâmicas para o projeto da máquina laser.....	104
Tabela 5.2 - Especificações básicas e do ciclo de vida para o projeto do laser.....	104
Tabela 5.3 - Especificações estruturais e do campo de trabalho para o projeto do laser.....	105
Tabela 5.4 - Avaliação das concepções de estrutura para a máquina laser. ....	106

Tabela 5.5 - Avaliação dos sistemas de transmissão para o projeto do laser.....	108
Tabela 5.6 - Avaliação de guias e mancais para o projeto de máquina laser. ....	108
Tabela 5.7 - Matriz morfológica para o projeto de máquina laser.....	108
Tabela 5.8 - Informações técnicas dos principais componentes para o dimensionamento do acionamento da concepção de máquina <b>E1</b> .....	112
Tabela 5.9 - Acionamento escolhido para o eixo X da máquina laser (adaptada de Pacific, 2001) ..	114
Tabela 5.10 - Critérios generalizados para o projeto de uma máquina Laser.....	116
Tabela 5.11 - Matriz de avaliação por comparação dos pesos dos critérios generalizados de seleção para o projeto de máquina laser.....	116
Tabela 5.12 - Valoração dos critérios quantitativos para as concepções de máquina laser.....	117
Tabela 5.13 - Valorização dos critérios qualitativo para as concepções das máquinas laser.....	118
Tabela 5.14 - Determinação do “valor de utilidade” das concepções de máquina laser. ....	118
Tabela 5.15 - Simbologia dos componentes e das grandezas físicas participantes na modelagem do eixo X.....	120
Tabela 5.16 - Valores dos elementos que compõem o modelo do eixo X.....	123
Tabela A.1 - Diagrama de blocos para sistemas mecânicos translacional. ....	133
Tabela A.2 - Diagrama de blocos para sistemas mecânicos rotativos. ....	133
Tabela A.3 - Diagrama de blocos para sistema elétrico. ....	133
Tabela A.4 - Características de um PID.....	134

**LISTA DE SIGLAS**

<b>ATC</b>	<i>Automatic Tool Change.</i>
<b>CAD</b>	<i>Computer aided design.</i>
<b>CAM</b>	Computer aided Manufacturing
<b>CLP</b>	Controlador lógico programável
<b>EMC</b>	Departamento de Engenharia Mecânica.
<b>Laser</b>	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.</i>
<b>LHW</b>	Laboratório de <i>Hardware</i> .
<b>MCB</b>	<i>Motion Control Board.</i>
<b>NC</b>	<i>Numeric Control.</i>
<b>NeDIP</b>	Núcleo de Desenvolvimento de Produto do EMC/UFSC
<b>OEM</b>	<i>Original equipment manufacturer</i>
<b>PC</b>	<i>Personal Computer.</i>
<b>PID</b>	Algoritmo de controle Proporcional Integral e Derivativo.
<b>PDP</b>	Processo de Desenvolvimento de Produtos.
<b>RAM</b>	<i>Random Access Memory</i>
<b>ROM</b>	<i>Read-Only Memory</i>
<b>UFSC</b>	Universidade Federal de Santa Catarina.

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\mu$	Coeficiente de atritos das guias	
$\mu_F(v)$	Velocidade dependente do fator de atrito nas guias	
$\mu_{SL}$	Fator de atrito dos mancais do fuso	
$\eta$	Rendimento do conjunto	
$\eta_G$	Coeficiente de eficiência, para sistemas com engrenagens ou pinhão	
$\eta_{SM}$	Coeficiente de perda por atrito para sistema de transmissão por parafuso e castanha	
$a$	Aceleração no regime transitório	$m/s^2$
$b$	Coeficiente de atrito viscoso total aplicado no eixo	$Nm/rad/s$
$d_{mL}$	Diâmetro dos mancais	$m$
$d_{SP}$	Diâmetro do fuso de transmissão	$m$
$F_{aVL}$	Pré-carga axial nos mancais devido à força de usinagem	$N$
$F_{ax}$	Força necessária para acelerar a carga	$N$
$F_{PL}$	Força por pré-carga nas guias	$N$
$F_{tx}$	Força total que deve proporcionar o acionamento para acelerar a carga	$N$
$F_{VL}$	Força de usinagem	$N$
$F_{VT}$	Força produto da usinagem aplicado sobre as guias	$N$
$F_U$	Força de atrito no eixo X	$N$
$g$	Gravidade	$m/s^2$
$h_{sp}$	Passo do fuso da transmissão	$m$
$i$	Redução	
$j$	Inércia total de um eixo	$kgm^2$
$j_{ac}$	Inércia acoplamento	$kgm^2$
$j_{GT1}$	Inércia da polia do motor	$kgm^2$
$j_{GT2}$	Inércia da polia conduzida	$kgm^2$

$\dot{J}_m$	Inércia do eixo do acionamento	$kgm^2$
$\dot{J}_r$	Inércia na saída de um redutor	$kgm^2$
$\dot{J}_{SP}$	Inércia sobre do fuso de transmissão	$kgm^2$
$\dot{J}_{W+T}$	Inércia da carga sobre o fuso	$kgm^2$
$k$	Constante de elasticidade total no eixo	$N/m$
$l_{sp}$	Comprimento do fuso	$mm$
$m$	Massa translativa total do eixo	$kg$
$m_w$	Massa da peça a ser usinada	$kg$
$m_T$	Massa sobre as guias	$kg$
$M_b$	Torque necessário para movimentar a carga Transitória	$Nm$
$M_{rot}$	Torque para necessário para movimentar uma massa	$Nm$
$M_L$	Torque necessário para movimentar uma carga estacionária	$Nm$
$M_R$	Torques para vencer forças de atritos	$Nm$
$M_{RF}$	Torque necessário para vencer o atrito sobre as guias	$Nm$
$M_{RSL}$	Torque necessário para vencer o atrito dos mancais	$Nm$
$M_V$	Torque necessário para vencer forças de usinagem	$Nm$
$N$	Reação normal ao peso aplicado no eixo X	$N$
$rpm$	Revoluções por minutos do acionamento	$Min^{-1}$
$r_{Ri}$	Raio da polia ou do pinhão em sistemas de transmissões	$m$
$t_h$	Tempo de reposta em condição transitória	$s$
$u_{i,j}$	Valor atribuído á especificação i da concepção j	
$v$	Velocidade de trabalho no regime permanente	$m/s$
$x$	Distância	$m/s$
$w_i$	Peso de importância da especificação i	

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 - PROBLEMÁTICA .....	1
1.2 - OBJETIVOS.....	1
1.2.1 - Objetivo geral .....	1
1.2.2 - Objetivos específicos .....	2
1.3 - JUSTIFICATIVA .....	2
1.4 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	3
<b>CAPÍTULO 2 - AUTOMAÇÃO DE MÁQUINAS .....</b>	<b>5</b>
2.1 - AUTOMAÇÃO .....	5
2.2 - AUTOMAÇÃO DE MÁQUINAS .....	5
2.3 - EVOLUÇÃO DAS MÁQUINAS AUTOMATIZADAS .....	5
2.4 - SISTEMÁTICAS PARA O PROJETO DE AUTOMAÇÃO DE MÁQUINAS .....	7
2.5 - CLASSIFICAÇÃO DE PROJETOS PARA AUTOMAÇÃO PARA MÁQUINAS. ....	11
2.6 – SUBDIVISÃO DE UMA MÁQUINA AUTOMATIZADA.....	12
2.6.1 - Subsistema de comando/controle.....	13
2.6.2 - Subsistema de acionamentos eletromecânicos.....	20
2.6.3 - Subsistema mecânico .....	26
2.6.3.1 - Guias/mancais.....	28
2.6.3.2 - Transmissões mecânicas.....	31
2.6.3.3 - Acoplamentos.....	32
2.6.4 - Subsistema de medição e monitoramento .....	33
2.7 - ABORDAGENS PARA A PESQUISA DE COMPONENTES PARA O PROJETO .....	36
2.8 - CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	37
<b>CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS .....</b>	<b>39</b>
3.1 - INTRODUÇÃO.....	39
3.2 - PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS.....	39
3.3 - PLANEJAMENTO DO PRODUTO .....	40
3.4 - PROJETO INFORMACIONAL .....	41
3.5 - PROJETO CONCEITUAL .....	43
3.6 - PROJETO PRELIMINAR.....	46
3.7 - PROJETO DETALHADO.....	47
3.8 - CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	48
<b>CAPÍTULO 4 - SISTEMÁTICA PARA PROJETO DE AUTOMAÇÃO DE MÁQUINAS .....</b>	<b>49</b>
4.1 - INTRODUÇÃO.....	49

4.2 - FASE I - PLANEJAMENTO DO PRODUTO.....	49
4.2.1 - Atividade 1.1 - Definir o tipo de projeto .....	50
4.2.2 - Atividade 1.2 - Desenvolvimento das idéias de máquinas.....	50
4.3 - FASE II - PROJETO INFORMACIONAL.....	54
4.3.1 - Atividade 2.1 - Obtenção das especificações de projeto para uma máquina nova .....	55
4.3.2 - Atividade 2.2 - Obtenção das especificações para um projeto de melhoramento.....	60
4.4 - FASE III - PROJETO CONCEITUAL .....	64
4.4.1 - Atividade 3.1 - Desenvolvimento da concepção de estrutura da máquina .....	65
4.4.2 - Atividade 3.2 - Desenvolvimento das concepções de subsistemas da máquina .....	68
4.4.3 - Atividade 3.3 - Desenvolvimento da posição dos componentes sobre a máquina.....	74
4.4.4 - Atividade 3.4 - Dimensionamento dos acionamentos e escolha do comando/controle....	77
4.4.4.1 - Tarefa 3.4.3 - Avaliação dos acionamentos.....	81
4.4.4.2 - Tarefa 3.4.4 - Seleção e escolha do comando/controle.....	82
4.4.5 - Atividade 3.5 - Avaliação econômica e financeira da concepção de máquina .....	84
4.4.6 - Atividade 3.6 - Escolha definitiva da concepção de máquina .....	88
4.5 FASE IV - PROJETO PRELIMINAR.....	92
4.5.1 - Atividade 4.1 - Modelagem.....	92
4.5.2 - Atividade 4.2 - Simulação.....	97
4.6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS DA SISTEMÁTICA .....	98
<b>CAPÍTULO 5 - ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>99</b>
Atividade - 1.1 - Definir o tipo de projeto .....	99
Atividade - 1.2 - Desenvolvimento das idéias de máquina.....	99
Atividade - 2.1 - Obtenção das especificações de projeto para uma máquina nova .....	101
Atividade - 3.1 - Desenvolvimento da concepção de estrutura da máquina .....	105
Atividade - 3.2 - Desenvolvimento das concepções de subsistemas da máquina.....	106
Atividade - 3.3 - Desenvolvimento da posição dos componentes sobre a máquina.....	109
Atividade - 3.4 - Dimensionamento dos acionamentos e escolha do comando/controle.....	111
Atividade - 3.5 - Avaliação econômica e financeira da concepção de máquina .....	115
Atividade - 3.6 - Escolha definitiva da concepção de máquina .....	115
Atividade - 4.1 - Modelagem.....	118
Atividade - 4.2 - Simulação.....	122
<b>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .</b>	<b>125</b>
6.1 - CONCLUSÕES.....	125
6.2 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	127
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>129</b>
<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>132</b>
<b>FERRAMENTAS PARA A MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA MÁQUINA .....</b>	<b>132</b>

## Capítulo 1 - Introdução

### 1.1 - Problemática

A idéia de desenvolver uma sistemática para o projeto de sistemas em automação de máquinas, nasceu do interesse do Laboratório de Hardware (LHW/EMC) em dispor de procedimentos mais organizados, que permitam considerar os diversos aspectos importantes para desenvolver tais projetos, de modo que o projetista tenha uma visão abrangente do ciclo de desenvolvimento e ferramental para realizar seu projeto de maneira consistente.

Projetos em automação de máquinas têm sido freqüentemente realizados no LHW, já com bastante experiência nas fases do projeto preliminar, detalhado e de construção e teste de protótipos. Há interesse, porém, de começar a considerar procedimentos mais metódicos para as fases iniciais do desenvolvimento, ou seja, as fases de especificação do problema de projeto e concepção de alternativas de solução. Além disso, projetos de automação de máquinas pressupõem uma integração de múltiplas áreas de conhecimento e se isso não for considerando desde a especificação do problema, potencializam-se mudanças que podem atrasar o cronograma do projeto e/ou elevar os custos em fases posteriores do desenvolvimento.

Nesse sentido, a sistematização que resultará desse estudo visa orientar uma equipe de projetos de automação de máquinas disponibilizando ferramentas, procedimentos e métodos que permitam desenvolver projetos desde o entendimento do problema até as orientações formais para a análise de custos, otimização econômica, modelagem e simulação das soluções desenvolvidas.

### 1.2 - Objetivos

#### 1.2.1 - Objetivo geral

O objetivo geral do trabalho é desenvolver uma sistematização que proporcione procedimentos aos projetistas para desenvolver projetos de automação de máquinas, desde o entendimento do problema até a concepção, modelagem e simulação das alternativas de projeto.

### 1.2.2 - Objetivos específicos

Para implementar uma sistemática de processo de projeto para automação de máquinas devem se:

- Estudar, analisar e classificar os subsistemas que compõem uma máquina automatizada (comando/controle, mecânico, acionamento e medição);
- Pesquisar e analisar as metodologias utilizadas para desenvolver projetos de automação de máquinas;
- Analisar criticamente projetos de automação de máquinas desenvolvidos;
- Estudar e implementar a metodologia para o desenvolvimento de projetos de produtos industriais, Núcleo de Desenvolvimento de produtos (NeDIP).

### 1.3 - Justificativa

A incorporação da automação em processos mecânicos tem tido um considerável crescimento durante as últimas décadas. São várias as vantagens que pode ter um sistema automatizado. Isto implica que as empresas atuantes no ramo devem procurar novas estratégias para seguir sendo competitivas por meio de inovação, redução de custos, diversidades nas funcionalidades, novas idéias para adequar a automatização a sistemas mecânicos e vice versa.

É nesse sentido que esta sistematização visa ser uma contribuição, potencializando os procedimentos de projeto e dando ao projetista uma visão abrangente da ordem das atividades que devem ser desenvolvidas nas primeiras fases do projeto de automação de máquina e os procedimentos, métodos e ferramentas que este deve utilizar para desenvolver as concepções de máquinas considerando critérios técnicos e econômicos.

Por outro lado, esta sistematização visa ser a plataforma estrutural para projetos de automação de máquinas, a qual permitirá abrir uma variedade de caminhos para trabalhos e pesquisas que poderão complementá-la, visto que a área de automação de máquinas multidisciplinar.

O enfoque em máquinas automatizadas cartesianas com acionamentos eletromecânicos e trajetória controlada surge da possibilidade de poder

aproveitar os anos de experiências do Laboratório LHW desenvolvendo projetos de automação de máquinas, facilitando o acesso a informações, conhecimentos, experiências e procedimentos, entre outros antecedentes que facilitam o desenvolvimento da sistematização.

#### 1.4 - Estrutura da dissertação

A estrutura da dissertação é composta por seis capítulos como se apresenta na Figura 1.1.

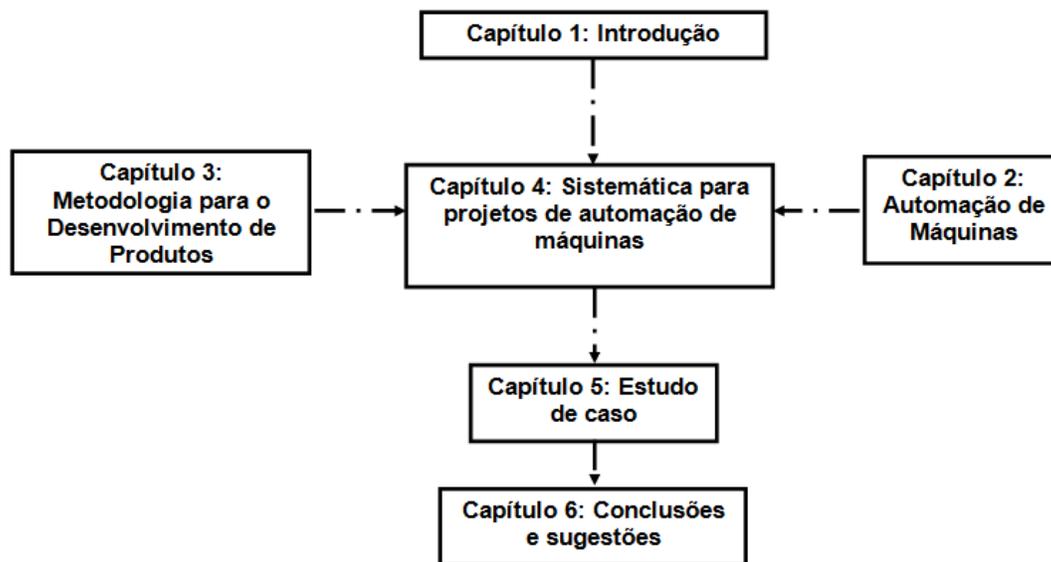


Figura 1.1 - Estrutura da dissertação

O capítulo de introdução (1) apresenta a problemática, objetivos, justificativa e a estrutura da dissertação.

Os capítulos de revisão (2 e 3) apresentam a fundamentação teórica para o desenvolvimento da sistemática proposta. Estas informações são principalmente conceitos, ferramentas, métodos, procedimentos, classificação de componentes, tabelas informativas, entre outros.

O capítulo 4 apresenta as doze atividades que constituem a sistemática proposta. Tem como início as pesquisas e análises das necessidades dos consumidores para o desenvolvimento de máquina automatizada e termina com a modelagem e simulação da concepção definitiva da máquina.

No capítulo 5 é apresentado um estudo de caso aplicando a sistemática, para o desenvolvimento do eixo X de uma máquina laser.

Por último, no capítulo 6, são apresentadas as conclusões do presente trabalho e uma série de sugestões para trabalhos futuros.

## Capítulo 2 - Automação de máquinas

Este texto sobre automação de máquinas tem o objetivo de ser um aporte introdutório e de conceitos para a sistematização, classificando os quatro subsistemas que compõem uma máquina automatizada segundo os seguintes quatro aspectos: funções principais, características principais, classificação de componentes e especificações. Esta classificação dos subsistemas é baseada totalmente na classificação apresentada por Martin (2005).

### 2.1 - Automação

Ações tomadas para que um processo seja parcial ou totalmente autônomo, comandado por um programa pré-estabelecido, sem intervenção humana.

### 2.2 - Automação de máquinas

Dentro dos processos de automação de máquinas, uma das primeiras iniciativas foi a eliminação da intervenção do homem no fluxo de informações dos processos. Com o tempo as máquinas deviam operar automaticamente a partir de um programa, onde os posicionadores deviam executar deslocamentos, de acordo à tarefa que se deseja realizar.

Na atualidade, para aumentar a flexibilidade das máquinas, cada eixo de movimento (rotativos/translativos) dispõe de um acionamento independente (dos demais eixos de movimento), sendo os diversos eixos de movimentos gerenciados centralizadamente por um sistema de comando/controle o qual é capaz de definir as grandezas de movimento (velocidade, posição, etc.) dos eixos da máquina, executando trajetórias de acordo ao *software* gerenciador implementado.

### 2.3 - Evolução das máquinas automatizadas

Caracterizar a evolução do universo de máquinas automatizadas não é objetivo deste trabalho, mas sim, apresentar um panorama geral focado em uma parte destas, máquinas-ferramenta para usinagem.

Mudanças significativas têm ocorrido no projeto de máquinas-ferramentas, motivadas por algumas tendências, como segue: O número e variedade de produtos e as exigências nas tolerâncias (mais precisão e melhor qualidade) vão continuar a aumentar; melhoria contínua do produto, que implica em um contínuo melhoramento das máquinas; redução de tempo de produção de peças, através de uma maior rapidez de resposta dos sistemas, etc.

As primeiras máquinas fresadoras eram utilizadas para superfícies planas (1D); com o tempo foram surgindo as versões 2D e 3D, implementando eixos de movimento simultâneos. Depois foram acrescentados os sistemas ATC (*Automatic Tool Change*) para a troca de ferramentas, que permitiram executar trabalhos de fresamento, perfuração, etc. podendo ser estes realizados ao mesmo tempo. Hoje existem as máquinas multifuncionais as quais podem efetuar dezenas de tarefas distintas. Com a necessidade de desenvolver peças mais complexas, especialmente para a indústria aeroespacial, o controle sobre os eixos de movimento foi sendo aperfeiçoado, graças aos desenvolvimentos da tecnologia de comando/controle. Hoje no mercado é possível encontrar centros de usinagem com cinco eixos translativos, um eixo C para giro da mesa, um eixo A para a inclinação da mesa de trabalho e um eixo B para a inclinação do eixo principal (MORIWAKI, 2008). A Figura 2.1 (A) apresenta a configuração de uma máquina-ferramenta multifuncional, com cinco eixos translativos mais um eixo rotativo e (B) uma máquina de usinagem clássica com seis eixos.

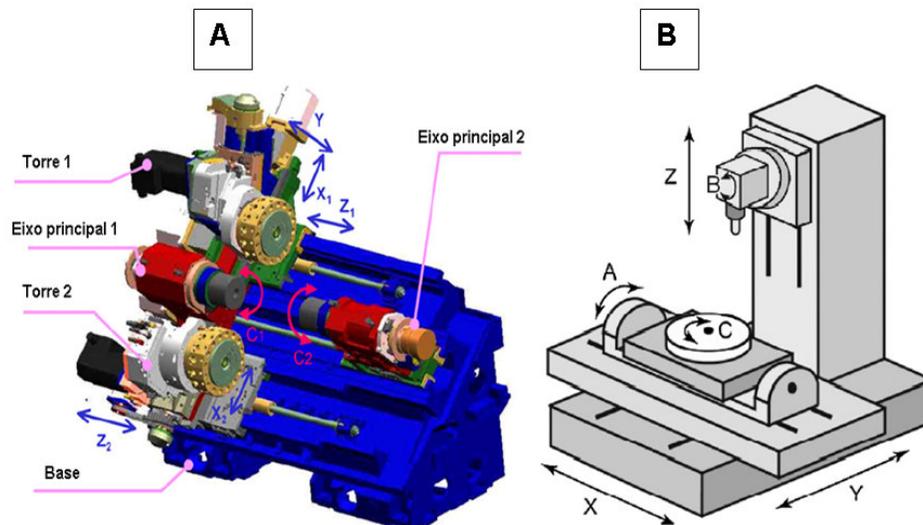


Figura 2.1 - Máquinas multifuncionais (A) máquina multifuncional recente (B) máquina multifuncional clássica (adaptado de Moriwaki, 2008).

Neste sentido a sistemática proposta neste trabalho visa a ser um aporte que para projetos de máquinas automatizadas, facilitando o melhor entendimento do problema e oferecendo procedimentos, ferramentas, métodos, etc. que permitam desenvolver máquinas novas ou modernizar e recondicionar máquinas existentes, capazes de suprir as necessidades presentes e futuras dos usuários.

## 2.4 - Sistemáticas para o projeto de automação de máquinas

Na pesquisa foram encontradas algumas propostas para o desenvolvimento de projetos para máquinas automatizadas. Na Figura 2.2, por exemplo, apresenta-se um modelo utilizado para desenvolver projetos de sistemas mecatrônicos, que é chamado modelo V (*V-model*).

O modelo V é constituído por um macro-ciclo que tem como entrada os requisitos para o desenvolvimento do projeto. Estas informações provêm a atividade do projeto do sistema na qual devem ser realizadas tarefas para identificar os problemas principais para o desenvolvimento do projeto, montar uma estrutura (síntese funcional) com as funções globais e parciais do sistema, procurar princípios de solução que atendam as funções mencionadas, criar várias variantes de princípios de soluções (concepções de máquinas) as quais devem ser avaliadas e selecionadas.

As concepções mais promissoras são transferidas à atividade seguinte (domínios específicos) onde, sobre estas, são aplicados os conhecimentos das áreas específicas (engenharia eletrônica, engenharia mecânica e tecnologia da informação). Esta atividade é seguida da integração das áreas específicas (sistema integrado) onde a concepção de máquina é modelada e simulada por meio de uma análise computacional e/ou protótipos para sua posterior verificação e validação.

O ciclo pode ser repetido várias vezes para atingir um maior nível de maturidade. Vale destacar que cada atividade apresentada no Modelo V, apresenta um conjunto de tarefas individuais, para o processo (NEUGEBAUER, DENKENA & WEGENER, 2007).

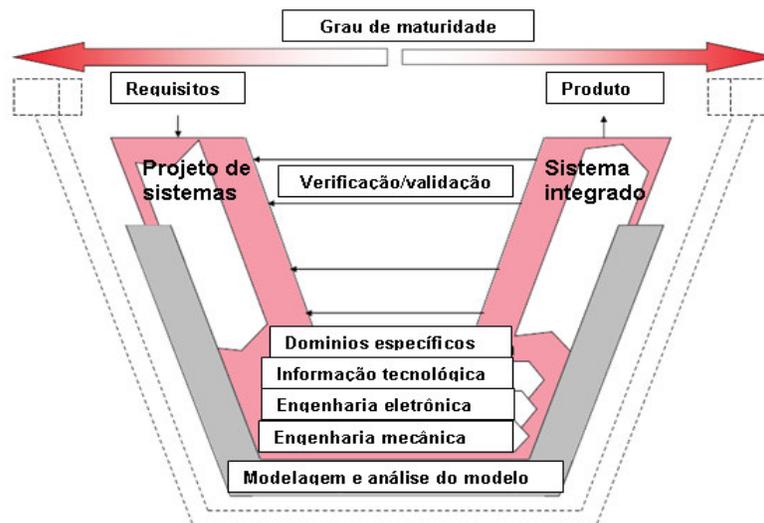


Figura 2.2 - Modelo V - processo de modelo de para projetos de sistemas mecatrônicos (adaptado de Neugebauer, Denkena & Wegener, 2007).

Outra abordagem analisada foi a proposta por Burgoa (2004) para desenvolver um sistema impressor de formato extra-largo. Em uma primeira etapa foram estabelecidas as especificações de projeto, principalmente de forma quantitativa. Em seguida, foi realizado um estudo do estado-da-arte das impressoras existentes no mercado e analisados os componentes que permitem o movimento dos eixos da máquina (acionamentos, transdutores, sistemas de transmissão, guias/mancais, etc.). Os componentes anteriormente mencionados foram inseridos em uma matriz morfológica para na seqüência

desenvolver um esquema da concepção de máquina (Figura 2.3). Finalmente a concepção de máquina foi dimensionada, modelada e simulada; foram analisados os resultados e é construído e detalhado o protótipo.

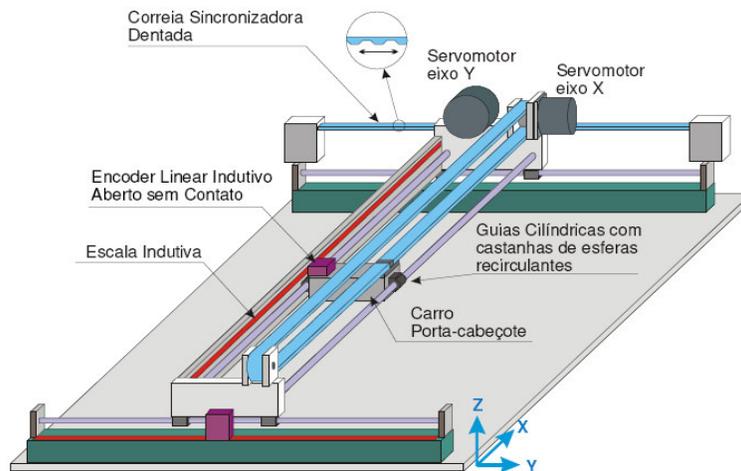


Figura 2.3 - Concepção de máquina de um conjunto impressor (adaptado de Burgoa, 2004)

Stoeterau (1999) desenvolveu o protótipo mecânico de uma máquina-ferramenta com comando numérico para usinagem de ultra-precisão. Ali foi analisado o estado-da-arte das máquinas-ferramentas para usinagem de ultra/precisão, foram identificadas as necessidades dos distintos clientes externos, internos e intermediários (*stakeholders*) do projeto; baseando-se nas necessidades dos clientes foram obtidas as especificações do projeto (geometria, cinemática, dinâmica, tipos de peças que serão produzidas, material das peças, etc.). As especificações do projeto foram representadas de forma quantitativa e qualitativa e classificadas segundo sua prioridade para o projeto.

Na seqüência, foi implementada a síntese funcional, que propiciou a integração das funções das máquinas-ferramentas; foi gerado um conjunto de arranjos construtivos para a estrutura da máquina-ferramenta e realizado um comparativo entre os componentes dos subsistemas da máquina-ferramenta (subsistema mecânico, acionamentos, comando/controle e medição).

Ao final o autor desenvolveu a modelagem e simulação do protótipo da máquina-ferramenta e a análise dos resultados do projeto.

Brenes (1994) realizou a modernização e análise dinâmica de uma máquina ferramenta NC. Em uma primeira etapa foi analisado o estado-da-arte segundo as características funcionais dos componentes que compõem os subsistemas das máquinas-ferramenta. Para o procedimento da modernização foi desenvolvida a seguinte seqüência de atividades: Foram estabelecidos os requisitos prévios do projeto; foi realizada uma análise da máquina a ser modernizada, avaliando as condições dos diferentes componentes que a compõem; foram listados os componentes a ser incorporados, trocados ou concertados e foi apresentado o detalhamento das alternativas propostas para cobrir as diferentes necessidades detectadas na etapa de análise, avaliando estas sob um critério técnico e econômico. Para finalizar este projeto, foi realizada a montagem e os ajustes dos componentes anteriormente selecionados, foi feita uma avaliação do comportamento dinâmico e metrológico da máquina para constatar o atendimento das especificações requeridas, foi acrescida uma etapa de otimização a qual consiste em realizar ajustes para corrigir e melhorar as características da máquina e, por ultimo, foram realizados os testes da máquina durante um funcionamento de produção.

Das abordagens revisadas observam-se classificações, descrições e avaliações dos componentes que compõem os subsistemas de máquinas automatizadas, análises das necessidades dos clientes, listagem das especificações para o projeto de forma quantitativa e qualitativa, tentativas para gerar concepções de máquinas e estruturas para estas, detalhamento dos protótipos, dimensionamentos de acionamentos, métodos de modelagem e simulação, análises metrológica do comportamento das soluções propostas.

Na maioria dos trabalhos pesquisados não são prescritos métodos relacionados com a procura e criação de soluções (MESCRAI, *Brainstorming*, etc.) que permitem desenvolver novos princípios de soluções, concepções de estruturas para a máquina e alternativas para posicionar os componentes sobre a estrutura, também não são prescritos métodos de ponderação e triagem de concepções (Pugh, de comparação aos pares, Função de utilidade, etc.) que permitem avaliar as concepções de máquinas, nem métodos que permitem a análise e a redução dos custos de aquisição dos componentes da máquina. As

especificações de projetos não são classificadas de acordo com o contexto que corresponda (estruturais, dinâmicas, básicas e do ciclo de vida).

Também neste sentido se delineiam os objetivos do presente trabalho, sistematizando as experiências existentes em desenvolvimento de máquinas na UFSC, melhorando-as e implementando novas ferramentas, métodos, procedimentos, etc. que permitam complementá-las, gerando uma sistemática que englobe a maioria dos conteúdos necessários para desenvolver um projeto de automação de máquinas.

## 2.5 - Classificação de projetos para automação para máquinas.

Projetos para automação de máquinas podem ser divididos em projetos de máquinas novas e projetos de melhoramento, os quais, por sua vez, são subdivididos conforme à proposta apresentada por Brenes (1994) (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 - Classificação dos tipos de projetos para máquinas automatizadas.

Classificação do tipo de projeto de máquinas automatizadas		
Tipo de projetos	Novo	Máquina nova Consiste no desenvolvimento de uma máquina nova, a qual pode ser inédita ou original, ou uma cópia de uma já existente. O desenvolvimento de projeto de ambos os tipos de máquinas deve-se dar desde as fases iniciais do desenvolvimento do produto (planejamento do produto).
	Melhoramento	Recondicionamento ( <i>rebuilding</i> ) Segundo Heeb (1989) consiste em restaurar uma máquina às suas especificações originais, através da troca ou conserto de peças. Para isto, a máquina é desmontada para permitir analisar todas as peças, determinando o grau de desgaste, fadiga, quebra etc. dos componentes. Através desta aplicação, consegue-se obter uma máquina em estado semelhante ao de uma nova, não significando, entretanto que seja daí moderna.
		Reforma ( <i>remanufacturing</i> ) Segundo Heeb (1989) e Simon (1990) este tipo de projeto é mais do que o recondicionamento, já que se incorpora tecnologia mais moderna à máquina substituindo componentes obsoletos e adquirindo condições tecnológicas equivalentes a uma máquina atual. Não se altera a parte de comando/controle.
		Modernização ( <i>retrofitting</i> ) A modernização consiste na renovação e/ou acréscimo de elementos constituintes do sistema de comando/controle da máquina (inclui ou não a incorporação de novos componentes), por exemplo, a adaptação de unidades comando/controle mais recentes em máquinas desatualizadas, com o objetivo de se reduzir o tempo de usinagem, aumentar e suavizar a aceleração/desaceleração do posicionador, compensar erros de deslocamento nos fusos de cada eixo, acrescentar novas necessidades ao sistema, etc.

Como se pode observar na Tabela 2.1, o recondicionamento é um tipo de projeto que só requer a substituição dos componentes antigos pelos mesmos componentes novos. Esse tipo de projeto não será considerado nesta sistematização.

## 2.6 – Subdivisão de uma máquina automatizada

Dentre as diversas partes identificáveis nas máquinas automatizadas que executam movimentos em eixos de posicionamento, enfocam-se neste trabalho os sistemas posicionadores. Justifica-se plenamente esta opção pela primazia que os sistemas posicionadores têm na definição do comportamento dinâmico do conjunto e, conseqüentemente, na materialização das especificações deste tipo de equipamento. Da análise de alguns trabalhos prévios em automação de máquinas, apresentada anteriormente, bem como de diversos outros, não mencionados, observa-se ser generalizável, que os sistemas posicionadores das máquinas automatizadas são compostos por quatro subsistemas claramente delineáveis (Figura 2.4), e que operam de forma totalmente integrada: subsistema comando/controle, subsistema de acionamento, subsistema mecânico e subsistema de medição. Esta subdivisão básica é necessária devido às características dos elementos que compõe cada subsistema; ela facilitará a obtenção de uma sistematização aplicável na prática de projeto em automação de máquinas, objetivo deste trabalho.

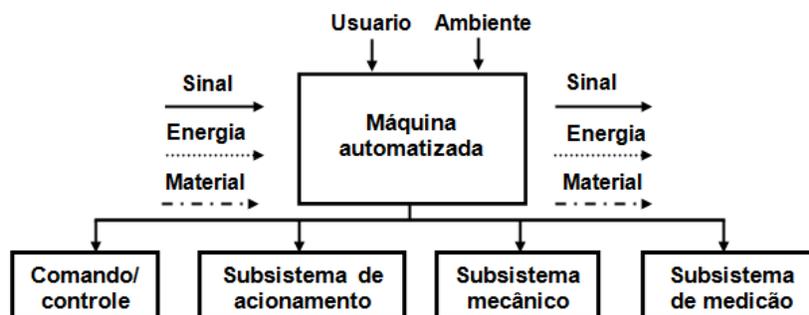


Figura 2.4 - Subsistemas que compõem uma máquina automatizada

Na Figura 2.5 observa-se um exemplo de concepção de posicionador para um eixo de movimentos de uma máquina automatizada. Um subsistema de comando/controle envia sinais elétricos a um subsistema de acionamentos de modo, que por meio das grandezas do subsistema mecânico, se converta movimento rotativo em translativo. Os movimentos são medidos e/ou monitorados pelo subsistema de medição, que realimenta esta informação ao subsistema de comando/controle.

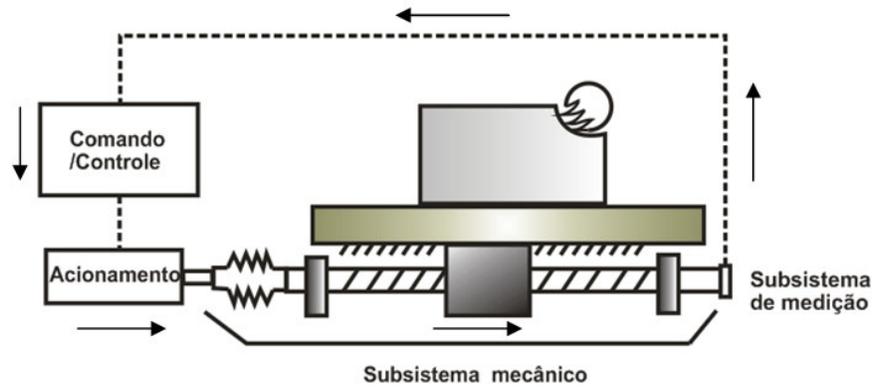


Figura 2.5 - Interação dos subsistemas que compõem uma máquina automatizada.

Apresenta-se a seguir o desdobramento dos subsistemas que compõem os posicionadores em máquinas automatizadas e seus requisitos principais. Serão considerados os componentes mais usuais em projetos de automação de máquinas, que, conforme informado logo ao início deste capítulo, são classificados segundo os quatro aspectos seguintes: funções principais, características principais, classificação das implementações e especificações dos componentes.

### 2.6.1 - Subsistema de comando/controle

Um comando/controle é um dispositivo (*hardware* e *software*), baseado principalmente em microeletrônica digital, que permite realizar as funções esboçadas no diagrama de blocos básico generalizado na Figura 2.6.

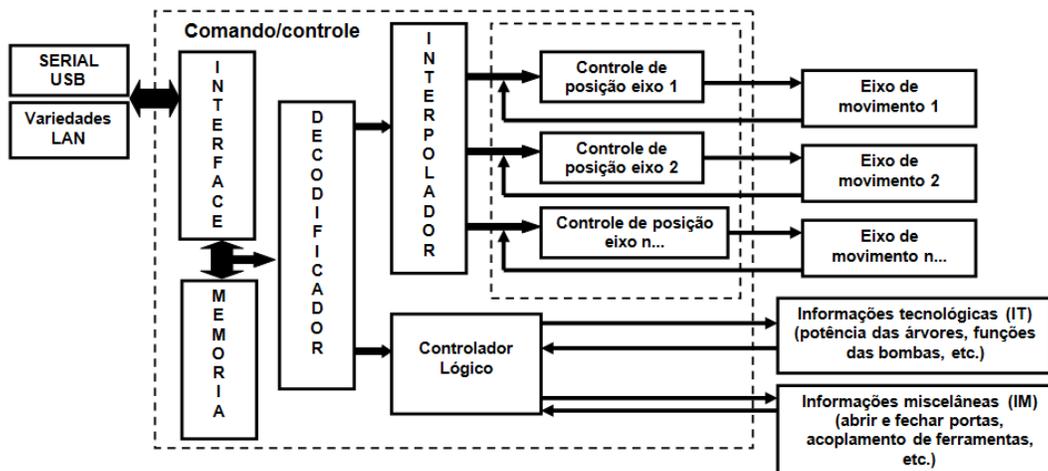


Figura 2.6 - Diagrama de blocos do subsistema comando/controle.

No diagrama de blocos básico de um comando/controle observam-se à esquerda dois tipos de “usuários” conectados à função interface que serve como meio de comunicação da máquina automatizada. Através dela são carregadas/descarregadas (bidirecional) as informações concernentes aos programas-peças, os conjuntos de parâmetros de máquina bem como funções de operação com comando direto ou comando remoto da máquina. Programa-peça são armazenados e gerenciados na função memória. A função do decodificador separa as informações geométricas (IG), tecnológicas (IT) e miscelâneas (IM) – que são todas as restantes, não classificáveis como geométricas e tecnológicas.

As informações de geometria são transferidas à função interpolador, que fornece referências de grandezas de movimento (posição) às  $n$  funções de controle de eixo de movimento (posicionamento). Na saída destas  $n$  funções de controle de eixo de movimento atinge-se a interface do subsistema de comando/controle com o processo; ali fluem sinais analógicos (padronização clássica) que são impostos como referência aos  $n$  acionamentos posicionadores. Cada uma das  $n$  funções controle de eixo de movimento permite controlar sua variável de saída (que já é a referência de velocidade para o sistema de acionamentos do respectivo eixo de movimento) a partir da comparação de sua informação de referência (posição) com a informação de realimentação proveniente do sistema de medição de posição do respectivo eixo de movimento, sendo o resultado dessa comparação o denominado erro de posição. À função controle de eixo de movimento ainda se faculta aplicar filtragem estática e às vezes também dinâmica a esta variável erro de posição.

A função controlador lógico (CL) processa as variadas informações tecnológicas (IT) como, por exemplo, velocidade do eixo-árvore e corte, controle do refrigerante, troca de ferramentas etc. e as diversas informações miscelâneas (IM) como por exemplo sinalização, segurança, etc.; também a função controlador lógico (CL) tem interface com o processo: Fornece em sua saída sinais de comando digitais discretos e/ou codificados para atuadores, indicadores etc. e recebe em sua entrada sinais digitais de sensores e transdutores, de botoeiras, etc., que indicam os estados das variáveis discretas do processo.

Outras funções, como apoio ao (auto) teste operacional da máquina automatizada, auto-sintonia de parâmetros ajustáveis, entre outros.

São numerosas as características importantes do subsistema comando/controle, em consequência das igualmente numerosas funções desempenhadas por este subsistema. De modo geral as características aplicáveis derivam das exigências básicas de precisão e rapidez de funcionamento. Apontam-se alguns exemplos: ter resolução compatível com o processo que se quer automatizar, permitir operação com a rapidez exigida (recai especialmente sobre o desempenho do sistema de processamento digital),

Alem dessas, acrescentam-se características dos aspectos de ergonomia incluso simplicidade operacional, fácil manutenibilidade, baixo consumo de energia, robustez para o ambiente de chão de fábrica, adaptabilidade ao tipo de processo que se quer automatizar e também aos outros subsistemas da máquina, imunidade à má qualidade de energia de alimentação e a fatores climáticos.

Na Figura 2.7 é apresentada uma classificação das soluções mais comuns utilizadas para a aquisição de um comando/controle para projetos de automação de máquinas.

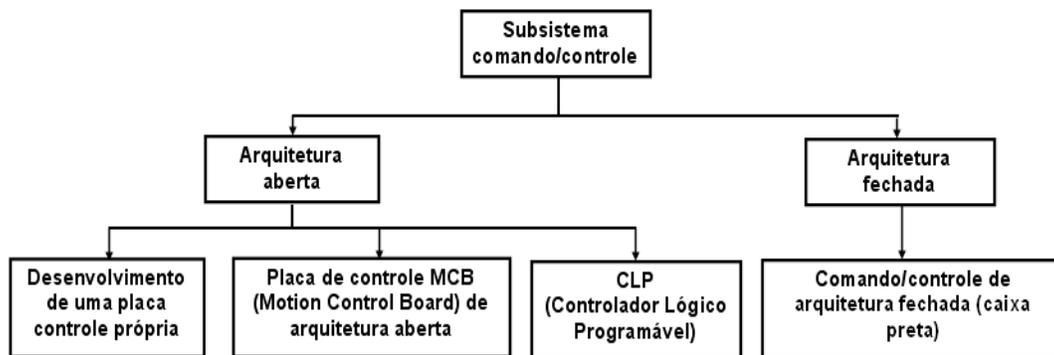


Figura 2.7 - Tipos de implementação de comandos/controle

Em uma primeira subdivisão, existem apenas duas possibilidades: a que impede toda e qualquer possibilidade de alteração de hardware e do software gerenciador interno (firmware) pelo aplicador (solução dita de arquitetura fechada ou caixa-preta); a outra possibilidade trata-se de uma solução

comumente denominada de arquitetura aberta, em que, ao contrário da anterior, é possível - e pode ser necessário - adaptar, acrescentar, eliminar e/ou alterar mais ou menos livremente algumas/todas as funções e/ou suas características através de alterações de software e/ou hardware pelo aplicador.

Os comando/controles de arquitetura fechada disponíveis no mercado (caixa preta) são todos destinados a máquinas bem específicas e convencionais (tornos, furadeiras, fresadoras, centros de usinagem, retíficas, injetoras de plástico etc.). Uma adaptação a outros processos é praticamente impossível (seria mais trabalhoso e de muito pior resultado do que usando se elegem as outras soluções). Definitivamente não se recomenda. Mas, quando numa opção por este tipo de comando/controle for o caso, a tarefa básica resultante é a instalação (integração) do mesmo aos demais subsistemas da máquina. Consta de três partes: A integração física, isto é o projeto da instalação mecânica e da fiação elétrica do subsistema aos outros com os quais tem interface comum; a realização do software do controlador lógico (CL) que é programa de automação para processamento das informações tecnológicas (IT) e informações miscelâneas (IM), que executa a função controlador lógico (CL) (Figura 2.6); a customização dos (vários..) parâmetros de máquina (por exemplo, número de eixos, resolução do sistema de medição de posição, ganhos dos controladores, etc.)

Estes comando/controles são encontrados no mercado geralmente na forma de painel de comando independente para integrar na própria máquina; também há versões para integrar em PC.

Como vantagens estes comando/controles exigem curto tempo de desenvolvimento do sistema (quando adequadamente escolhido, é o menor de todas as soluções de implementação), não exigem conhecimento de microeletrônica e apenas um certo conhecimento de programação do controlador lógico (CL). Todo esforço de realização concentra-se na integração e sintonia dos subsistemas.

Entre suas desvantagens já citou-se que não permitem alterações da estrutura (*hardware*), que são destinadas a somente um tipo específico de máquina/processo e que não permitem alterações no software interno firmware.

As soluções existentes do tipo aberto podem ser diferenciadas em alguns subtipos, pois apresentam características bastante heterogêneas, que influem principalmente nos procedimentos de aplicação. Para facilitar o processo seletivo em projeto adotou-se aqui uma subdivisão em três modalidades de implementação abertas (Figura 2.7).

Iniciando pela solução de implementação radicalmente antagônica ao de uso de uma arquitetura fechada desponta o subsistema de comando/controle implementado a partir de um desenvolvimento de uma solução – “placa” - própria. Esta pode ser destinada para a automatização de qualquer tipo de máquina por apresentar uma total flexibilidade estrutural (por exemplo, quantidade de eixos de movimento a ser controlados, quantidade de entradas/saídas necessárias ao processo, etc.) e funcional (por exemplo a definição dos *softwares* inclusive o *firmware*, etc.).

A implementação do subsistema de comando/controle com tais placas consiste de vários níveis de trabalho; é o caso em que nada é obtido pronto e tudo tem que ser desenvolvido: de partida deve-se desenvolver todo o *hardware* (por exemplo, processador, memória de armazenamento de dados e programa, interfaces de entrada/saída, etc.); segue-se programando (*software firmware*) todas as funções de comando/controle como: interpolador englobando processamento dos parâmetros mecânicos da máquina; parte digital das malhas de controle como comparador, controladores e inclusive da codificação digital-analógica ou gerador de trajetórias; decodificador de linguagem de programa-peça que pode ser um arquivo de saída de CAD/CAM; programar a função controlador lógico (CL) que inclui definir uma linguagem de programação de controlador lógico (CL); programar um gerenciador da memória de programas-peça; *drivers* gerenciadores das interfaces, etc. em geral em linguagem *assembly* para rotinas de alto desempenho, de funções que executem em tempo real. Como se pode inferir, muito trabalho, muito especializado. Em uma próxima etapa, no nível de integração do subsistema de comando/controle, recai-se nas realizações das tarefas que também são exigidas no caso de sistemas fechados, já descritas acima.

Este tipo de implementação em placa customizada, uma vez pronto pode ser caracterizado como um dispositivo desenvolvido completo, especificamente para a máquina, dispondo de um indicador e um teclado

próprio, permitindo a interface direta entre a máquina e usuário. Após desenvolvida tal placa tem-se uma alternativa de implementação de baixo custo. Porém para atingir este ponto consome-se um elevado tempo de desenvolvimento e são exigidos conhecimentos especializados de eletrônica e programação, que é quase desnecessário dizer, representa alto custo, provavelmente (muito) maior do que seria o custo de aquisição de uma implementação do tipo sistema fechado (pronto), caso disponível. Trata-se dos altos custos – em homens-hora - de desenvolvimento. Recomenda-se, em decorrência, eleger esta opção apenas quando as outras forem seguramente impossíveis. Entretanto, caso haja previsão de uma produção seriada, esta opção pode vir a ser também economicamente a mais atraente, sendo elegível mesmo quando outras opções estiverem disponíveis. Neste caso o alto custo inicial, de desenvolvimento de protótipo, não incide mais nas demais peças, podendo ser considerado diluível nas partes do lote produzido. Desvantajosa permanece sempre a necessidade de manutenção própria em caso de falhas; também a necessidade de se auto-abastecer de sobressalentes abrindo novas frentes de atividade (e custos) inexistentes ao se utilizar componentes comerciais (supondo garantida a disponibilidade durante prazo suficiente).

Uma variante na opção de implementação do subsistema de comando/controle baseado em placa de desenvolvimento próprio é utilização da placa própria embutida/integrada em um *hardware* tipo PC ou interfaciada a este. Nestes casos dispensam-se o desenvolvimento de funções que podem ser assumidas pelo PC – em geral várias, exceto as de execução em tempo real, como interpolador e as funções pertinentes às malhas de controle de posição (comparador, controlador, conversor D/A, interface ao subsistema de medição de posição).

Uma segunda via de arquitetura aberta representa a implementação do subsistema de comando/controle com uma solução de arquitetura aberta baseada em um pacote constando de uma placa de controle de movimento, *MCB (Motion Control Board)* comercial em formato *OEM* e *software* correspondente. Pode ser utilizada para comandar/controlar qualquer tipo de máquina automatizada por ser uma placa amplamente re-programável e re-configurável, oferecendo assim a seu aplicador muitas possibilidades de adaptação às especificidades de seu processo, na parte do *software*.

Entretanto, o *hardware* nesta solução de implementação é fechado, o que não permite quaisquer alterações estruturais; dada sua concepção este tipo de placa deve ser embutido ou ligado a um PC.

As funções de processamento de informações tecnológicas (IT) e miscelâneas (IM), de controlador lógico (CL), são programadas utilizando *softwares* fornecidos pelo fabricante, os quais apresentam todas as ferramentas informáticas necessárias para programar a placa para qualquer tipo de máquina por meio de uma interface amigável com fontes de aplicações (bibliotecas) que permitem rápida e fácil programação e inserção dos parâmetros da máquina.

Como vantagens, a solução com estas placas oferece curto tempo de desenvolvimento do sistema e menor necessidade de conhecimento de microeletrônica e sua programação; compatibilidade com outros *softwares* comerciais; pode ser acoplada a outras placas para operar em sistemas mais complexos (especialmente maior quantidade de eixos de movimento). Como desvantagens apresentam um elevado preço de aquisição.

Uma terceira opção de implementação do subsistema de comando/controle é o dispositivo denominado controlador lógico programável (CLP). É um sistema eletrônico digital programável e re-configurável, amplamente utilizado em comando/controle de processos contínuos com uma predominância de informação digital discreta, e em comando/controle de máquinas automatizadas sem funções de posicionamento em múltiplos eixos, o que requer a função de interpolação. Existem CLPs industriais e semi-industriais; CLPs compactos (que não permitem ampliar a quantidade de portas de entrada/saída) e modulares (permitem configurar a quantidade de suas portas segundo as necessidades). Os manuais e os *softwares* de programação são fornecidos pelo fabricante, os quais permitem programar as funções tecnológicas, miscelâneas e a programação do decodificador de tarefas.

Como vantagens os CLP comerciais exigem apenas um curto tempo de desenvolvimento de programa e como desvantagens, que não são orientados para processos que requerem alta rapidez de processamento de informação (partes operando em tempo real como no saída do interpolador e nas partes digitais das malhas de controle de posição) onde incide uma alta taxa de

aquisição de dados, ficando praticamente descartados para máquinas com estas especificações.

Para as inúmeras especificações estáticas e dinâmicas requeridas para a escolha de um subsistema de comando/controle deve ser considerada a compatibilização entre as características do subsistema de comando/controle e as características desejadas para a máquina (quantidade de eixos de movimentos, tamanho das coordenadas, interpolação de eixos, número de entradas/saídas, tipos e magnitudes de sinais, etc.).

A seguir citam-se somente alguns tipos de especificações, que podem ser extraídas de bibliografia específica, especialmente, catálogos de componentes destinados à implementação da função: quantidade e tipo dos eixos de movimento; resolução e precisão de posição; quantidade e tipos de interfaces com usuário; previsão para controle remoto da máquina automatizada (por exemplo: para operação como equipamento de um sistema flexível); tipos de codificação (linguagens) de programa-peça decodificáveis; tipos de interpolação e quantidade de eixos de movimento interpoláveis simultaneamente; tipo e quantidade de interfaces lógicas; tipo de sinais de saída e entrada na interface dos controles de posição; tamanho e gerenciamento da memória de programa-peça; alterabilidade (se parcial ou total) do programa gerenciador do subsistema de comando/controle; transponibilidade do software para outro hardware (por exemplo, mais moderno); tipos de controladores de posição disponíveis/implementáveis; tipo de simulação do processo em tela do subsistema de comando/controle – se em tempo real ou prévio; etc.

### **2.6.2 - Subsistema de acionamentos eletromecânicos**

A função básica dos subsistemas de acionamentos em automação de máquinas é suprir energia mecânica ao(s) subsistema(s) mecânico(s) na maioria dos casos para produzir deslocamentos de massas ou impedi-los.

Uma função decorrente desta função básica prende-se a necessidade prática de se obter energia mecânica a partir de outras formas de energia mais facilmente transportáveis; evidentemente a melhor opção sendo a energia elétrica, caracteriza então uma função de conversão de energia no âmbito do subsistema de acionamentos, a conversão eletromecânica. Desta forma é

possível sintonizar o presente trabalho com as linhas de pesquisa e desenvolvimento em automação de máquinas do Laboratório de *Hardware* do EMC-UFSC mantendo-se aqui uma restrição do universo dos acionamentos aos que utilizam energia primária elétrica para a obtenção de energia secundária mecânica, e que, paralelamente, representa hoje a grande massa de aplicação de acionamentos em automação de máquinas.

Paralelamente, as funções de aplicação de acionamentos em projetos de automação de máquinas são diversificadas. Em uma máquina automática comercial moderna encontram-se atualmente dezenas de acionamentos executando variadas funções de motorização, mas que se deixam sub-classificar em 3 tipos básicos de funções de aplicação, devido submeterem-se a características claramente compartilhadas por todos elementos dentro das classes seguintes:

Acionamentos para a função de posicionamento, cujas características mais importantes devem ser duas: resolução/precisão de posicionamento e rapidez de resposta. Na função posicionamento, caracterizada por freqüentes ciclos de aceleração/desaceleração, a carga mecânica preponderante é inercial. Das equações do movimento observa-se diretamente que a grande demanda sobre o acionamento para posicionamento é por força/torque não importando a potência mecânica disponível. Exemplo: função de motorização em eixos de movimento/posicionamento. Dentre os acionamentos para posicionamento se destacam os servomotores (*Brushless*, CC e CA campo orientado).

Acionamentos para potência/velocidade caracterizam-se pela função de ter que suprir a parcela preponderante de potência mecânica demandada pelo processo da máquina automatizada, geralmente tendo também uma função de manter uma velocidade (uma rotação) pré-determinada. A característica básica é, portanto a suficiente disponibilização de potência mecânica. Uma tendência é de poder obter velocidades (rotações) de operação cada vez mais elevadas, o que significa possibilidade de ainda maiores potências mecânicas. Como as potências nesta função de aplicação são muito maiores do que as dos acionamentos para as outras duas, torna muito relevante a característica de alta eficiência nos acionamentos para potência/velocidade. A carga mecânica nesta função de aplicação é preponderantemente caracterizada por potência

de dissipação (nas funções de atrito mecânico) sendo praticamente inexpressiva a carga inercial. Exemplo: motorização de eixo-árvore. Dentre os tipos de acionamento indicam-se os motores CA síncronos e assíncronos e os *brushless* em árvores mais sofisticadas.

Acionamentos para funções miscelâneas (não posicionamento nem velocidade). Nesta classe funcional procurou-se enquadrar todos os demais casos de motorização no âmbito de uma máquina automatizada, sendo que as características mais importantes para esta aplicação não precisam estar diretamente baseadas em grandezas básicas (mecânicas) e sim convenientemente em grandezas secundárias como confiabilidade e custo de aquisição. A carga mecânica preponderante neste tipo de aplicação de acionamentos também é dissipativa, porém os níveis de potência são inexpressivos se comparados aos da aplicação acima (eixos-árvore). Quando existe, a carga inercial nestas aplicações não é representativa para influir no comportamento dinâmico da máquina como um todo. Exemplos de funções de aplicação: motorização de bombas, ventiladores, trocadores/fixadores de ferramentas, transportadores/removedores de resíduos, alimentadores de material, movimentação motorizada de aberturas da carenagem etc.

Na Figura 2.8 é apresentada uma classificação compacta dos acionamentos eletromecânicos rotativos mais usuais para todos os (3) tipos de funções de aplicação em projetos de automação de máquinas referidos anteriormente.

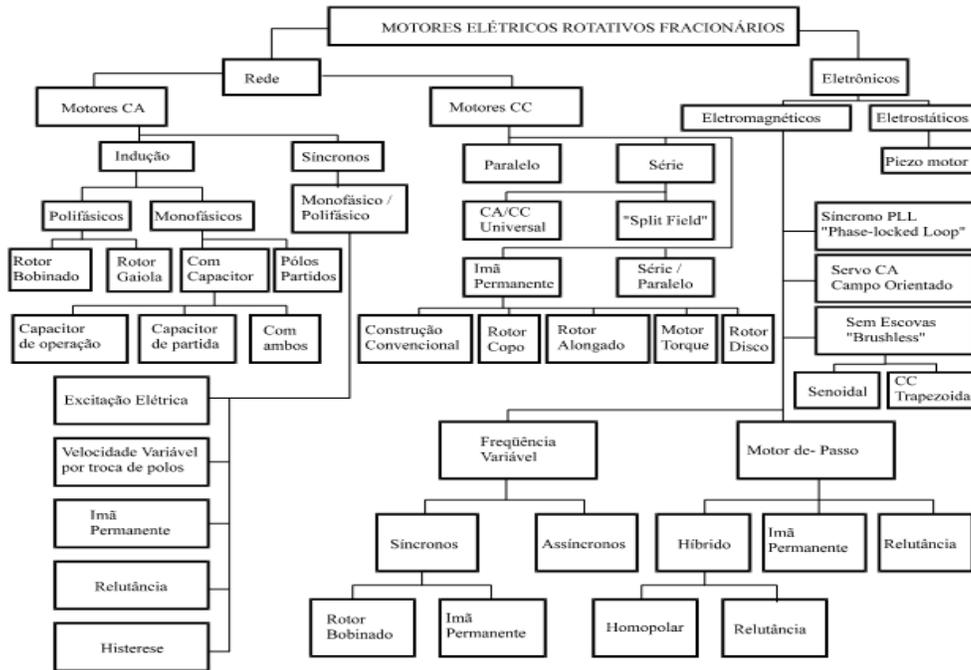


Figura 2.8 - Classificação dos motores elétricos rotativos (adaptado de Burgoa, 1996)

Com relação a Figura 2.8 e de uma maneira geral pode-se selecionar os tipos de acionamentos localizados no ramo esquerdo (sob “Rede”) para as funções miscelâneas e para Potência/Velocidade mais simples, deixando os tipos do lado direito (sob “Eletrônicos”) para as funções de aplicação Posicionamento e para funções Potência/Velocidade mais sofisticadas (com controle de velocidade mais severo).

Ao longo do desenvolvimento de projetos de automação de máquinas, conforme já relatado no início deste capítulo, surgiram certas subclassificações que serão trazidas a seguir, pois auxiliam no processo de seleção das soluções mais adequadas para cada tipo de aplicação. Conforme já salientado, no presente trabalho o foco recai sobre a função de posicionamento em máquinas automatizadas utilizando acionamentos eletromecânicos:

Quanto ao tipo de movimento produzido podem ser definidas classificações em acionamentos de movimento rotativo ou translativo, sendo ainda muito comuns os primeiros, mas a opção técnica por acionamentos translativos existe e tende a prosperar com o desenvolvimento tecnológico,

visto que permitem eliminar funções implementadas com componentes mecânicos de alta complexidade/custo e/ou desempenhando insatisfatoriamente.

Acionamentos de movimento contínuo (por exemplo: acionamentos com motores CC e CA) com resolução de posição (idealmente) infinita; e acionamentos de movimento discreto ou incremental (por exemplo: o acionamento com motor de passo), isto é, com resolução de posicionamento finita.

Quanto ao processo físico de obtenção de energia mecânica (força/torque) a partir de energia elétrica acionamentos eletromagnéticos e eletrostáticos: Classificação segundo o princípio físico da conversão de energia elétrica em mecânica, passando por uma forma intermediária de energia eletromagnética (indutiva, inercial elétrica) sob a qual se identifica a grande maioria dos acionamentos em uso atualmente; ou por forma intermediária de energia eletrostática (capacitiva, potencial elétrica) que vem prosperando nas aplicações, por exemplo, acionamentos piezoelétricos.

Os acionamentos eletromecânicos também são classificados segundo sua forma construtiva (Figura 2.9), apresentando características que contribuem com a sua dinâmica: menor inércia, alta dinâmica de aceleração, alta dinâmica de torque, alto torque transitório, etc.

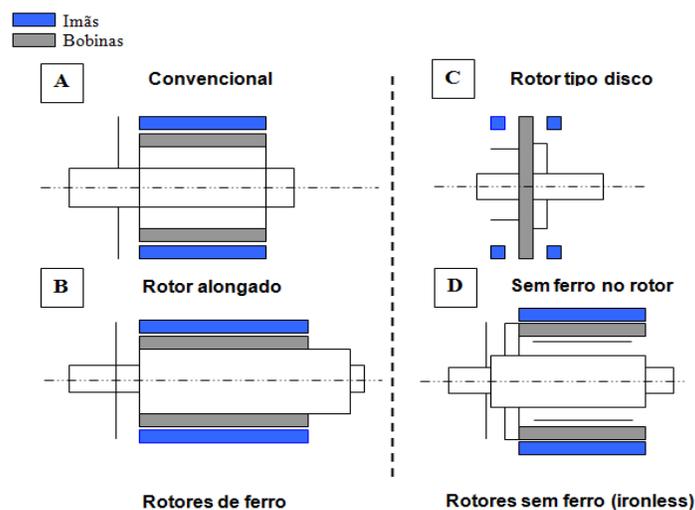


Figura 2.9 - Esquema simplificado de alguns tipos de construtivos de motores (adaptado de Burgoa, 1996)

O momento de inércia de um corpo depende de sua geometria, fundamentalmente do raio/diâmetro (na quarta Potência), da altura (apenas linearmente) e da distribuição da massa em um corpo cilíndrico girando em torno de seu eixo, e depende ainda de características do material de que é constituído, neste caso, especialmente a densidade volumétrica e sua distribuição espacial. Por exemplo, ao reduzir o diâmetro do rotor de um motor reduz-se inércia deste. Assim na Figura 2.9 pode-se observar como foi reduzido o diâmetro do rotor (A) e como foi aumentado o seu comprimento para manter o torque do motor inalterado enquanto a inércia é reduzida drasticamente (MARTIN, 2005). Já nos dois tipos com rotores sem ferro (“*ironless*” ou “*coreless*”) a redução de inércia é obtida da redução da densidade do volume girante. Para a comparação ser válida, subentende-se que os valores de torque dos quatro casos são iguais. Certamente pode se concluir que os motores com menor inércia própria terão a maior capacidade de aceleração.

O *drive*, em um sistema de acionamento, tem a função básica de disponibilizar ao motor do acionamento a potência elétrica (tensões e correntes) necessárias a cada instante de modo a impor os valores desejados para as grandezas mecânicas, a partir de sinais de comando provenientes do subsistema de comando/controle. Paralelamente outras funções podem ser implementadas nos drives: funções de monitoramento e proteção (para motor e *drive*), controle (limitação) de corrente ao motor e assim diretamente controle (limitação) de torque, função de controle de velocidade (acionamentos contínuos), função de modificação da forma da energia elétrica para adequar-se ao tipo de motor. função de redução de perdas de energia elétrica por dissipação, funções inerentes ao funcionamento e modos de funcionamento do conversor eletromecânico (acionamentos *brushless* e de passo). Drives devem ser utilizados em acionamentos para funções de posicionamento e quando se exige controle de velocidade em acionamentos de potência.

Os *drives* mais utilizados em subsistemas de acionamento para automação de máquinas estão apresentados na Figura 2.10.

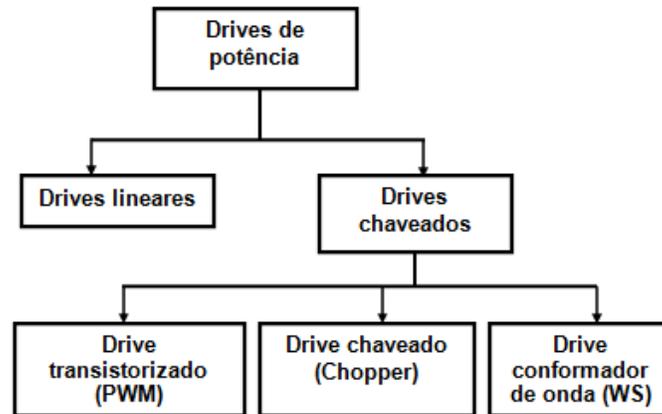


Figura 2.10 - Classificação dos *drivers*.

Os *drives* chaveados são muito mais eficientes que os lineares dissipando muito menos energia, exigindo bem menos ventilação e/ou refrigeração utilizando componentes eletrônicos de muito menor potência (menor custo), mas há situações especiais em que para níveis de potência mais baixos se utilizam *drives* lineares de alta dissipação porque oferecem o mínimo de ruído elétrico na potência disponibilizada, o que se reflete positivamente na qualidade de posição e velocidade realizáveis com os acionamentos, principalmente ao se energizar motores de alta dinâmica e/ou baixo fator de amortecimento (MARTIN, 2005).

As especificações para os diferentes tipos de *Drivers* são: o amplificador e acionamento devem estar obrigatoriamente casados (assegura um 100% de compatibilidade), máxima corrente contínua e de pico (para altas acelerações de curta duração), tensão máxima permitível em sua fonte de potência elétrica, funções secundárias realizáveis (proteções, etc.).

### 2.6.3 - Subsistema mecânico

O subsistema mecânico é constituído por: transmissões mecânicas, guias e mancais e os acoplamentos. Dentre as principais funções deste subsistema está a de transmitir os fluxos de energia e de informações, permitir/restringir o movimento dos componentes dentro dos graus de liberdade pré-estabelecidos, suportar e movimentar cargas, etc.

As características lineares e não-lineares que devem ser consideradas no subsistema mecânico para obter um bom comportamento dinâmico nas máquinas automatizadas, segundo Gross (1983), são:

1. Freqüência natural mecânica (característica linear): a freqüência natural mecânica é a freqüência na qual sistema mecânico seguirá vibrando, depois que cessa a excitação. Quanto mais alta a freqüência natural, maior a rapidez de reação do posicionador e menores as distorções provocadas nos sinais mecânicos. É necessário destacar que no contexto de automação de máquinas, os componentes mecânicos são os que apresentam os menores valores absolutos de freqüência natural dentro dos subsistemas que compõem as máquinas automatizadas. Portanto para que não se desperdice a boa qualidade dinâmica dos acionamentos, deve-se concentrar um esforço em conseguir uma máxima freqüência natural nos componentes do sistema mecânico.
2. Fator de amortecimento (característica linear): o fator de amortecimento é um indicativo da rapidez de redução de amplitude das oscilações nas máquinas automatizadas. A rigidez, massa e inércia são elementos armazenadores de energia. Em um sistema constituído apenas por armazenadores (ideais), a energia fornecida pelo acionamento circularia indefinidamente entre os armazenadores e o sistema estaria permanentemente em oscilação. Entretanto os elementos de amortecimento são dissipadores de energia, convertendo assim as energias das oscilações em calor. Se o amortecimento for diminuto e o aporte de energia suficiente alto, a função de dissipação não dará conta do excesso de energia e haverá oscilações sustentadas (forçadas). Ao contrário, sistemas com um maior amortecimento podem ficar completamente isentos de oscilação, porém tornam-se bem lentos, deixando de atender a característica de rapidez de reação.
3. Folgas nos componentes mecânicos (entre engrenagens, pinhão-cremalheira, fusos e castanhas, correia e polia, folga em mancais, etc.), são descritas pela função histerese (característica não-linear). Seu efeito sobre as variáveis de movimento é a distorção dos sinais; por exemplo, um movimento senoidal resulta alterado para um com forma de onda

composta por uma senóide de frequência original (não distorcida) somada a uma série de senóides de frequências múltiplas e amplitudes variadas.

4. As características elásticas (característica linear) dos materiais que compõem os componentes mecânicos interagindo com uma carga de atrito estático (característica não-linear) provoca o efeito descrito como zona morta (outra característica não-linear) este efeito de não-linearidade tem uma semelhança com a folga mecânica.

Em termos gerais, as estratégias para a minimização das não-linearidades mecânicas são: minimizar as folgas nos sistemas mecânicos; maximizar a rigidez (importante para o projetista lembrar que uma maior rigidez conflita diretamente com a alta dinâmica do sistema, originando inúmeras soluções de compromisso); minimizar a carga estática e em alguns casos colocar sensores de medição direta (subsistema de medição).

#### **2.6.3.1 - Guias/mancais**

As guias de movimento são elementos mecânicos de máquinas que permitem o deslocamento de componentes móveis segundo uma trajetória determinada, idealmente impedindo qualquer outro tipo de movimento e sendo capaz de suportar as cargas que são movimentadas. Para projetos de automação de máquinas as guias e mancais reais devem apresentar como característica uma folga pequena quanto possível, seguramente uma ordem de grandeza abaixo de resolução pretendida, de preferência tendendo a zero para não permitir outros graus de liberdade, um mínimo coeficiente de atrito (estático/dinâmico) apenas suficiente para obter amortecimento no sistema; ainda, uma elevada rigidez mecânica que, em alguns tipos de guias pode-se obter aplicando a pré-carga entre as partes em movimento relativo, mas tendo como conseqüências negativas um aumento considerável do atrito, da temperatura e uma diminuição da vida útil do componente.

O atrito nas guias/mancais é um parâmetro que, além de influenciar o comportamento estático nas máquinas automatizadas, também terá grande influência sobre o comportamento dinâmico. Entretanto, para que se possa estabelecer a sua influência sobre o comportamento dinâmico, não basta que

se conheça o seu valor estático. Também é necessário que se conheça seu comportamento ao longo de toda a faixa de velocidade de movimento na guia/mancal. Tal comportamento, expresso na forma de um gráfico de coeficiente de atrito em função da velocidade de movimento, chama-se curva característica estáticas de atrito e é apresentado na Figura 2.11.

Neste gráfico convém prestar atenção que os maiores problemas existentes em guias/mancais concentram-se nas imediações da velocidade zero. Para a função posicionamento em máquinas automatizadas é justamente a região de operação mais freqüentada: na imobilidade antes de iniciar um movimento de posicionamento e na imobilidade após atingida a posição desejada repetindo-se tudo a cada novo movimento. Em decorrência, a recomendação básica para o projetista de guias/mancais evidentemente para sistemas posicionadores é que evite tanto como possível envolver-se com componentes (mais acessíveis..) que não irão atender suas especificações de resolução/precisão de posicionamento. A numeração na figura está em ordem crescente para qualidade de movimento, que infelizmente é também a ordem crescente (exponencial!!) de custo das respectivas soluções.

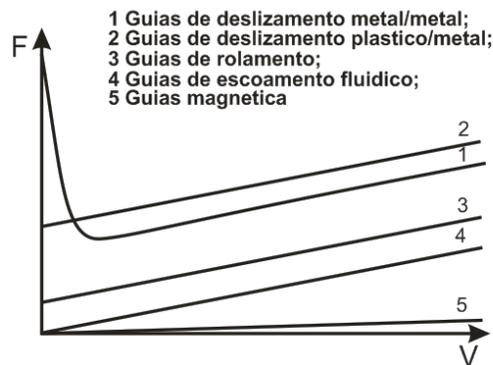


Figura 2.11 - Curvas características estáticas do atrito em guias e mancais  
(adaptado de GROSS, 1983)

No caso em que o atrito dinâmico é decrescente em função da velocidade, surge o efeito denominado "*stick-slip*" e em decorrência do surgimento desse efeito o movimento em baixas velocidades é irregular, gerando vibrações, inviabilizando posicionamento com precisão.

As guias de movimento para projetos de automação de máquinas podem ser classificadas, conforme a Figura 2.12, com relação ao tipo de atrito e a sua forma construtiva.

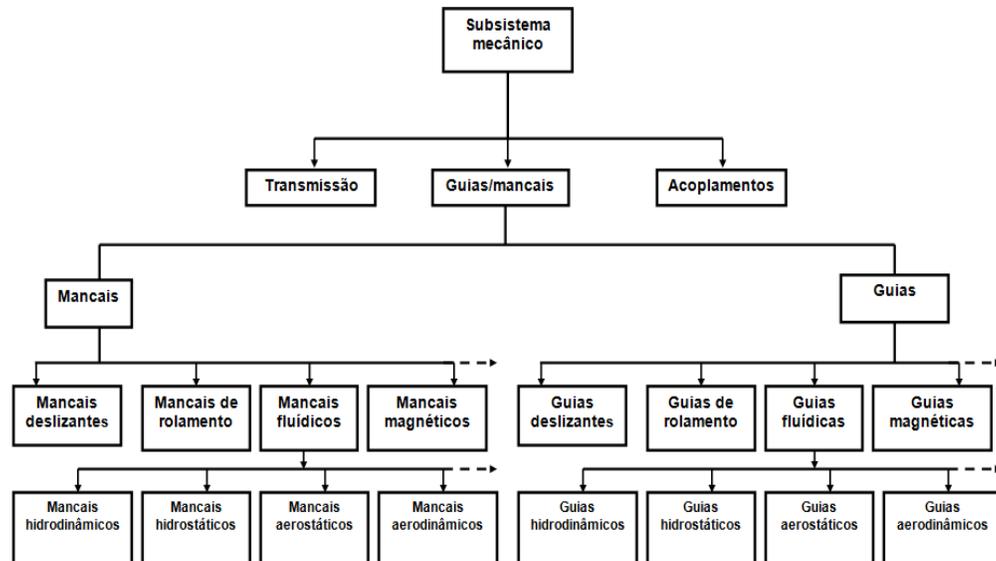


Figura 2.12 - Classificação das guias/mancais para projetos de automação de máquinas

Com relação às formas construtivas, as guias podem ser classificadas em fechadas ou abertas, e prismáticas ou cilíndricas. Segundo a forma construtiva e aplicação, as guias podem apresentar variações no seu comportamento dinâmico (rigidez, vibrações, capacidade de carga, atrito, etc.). Por exemplo, as guias deslizantes fechadas prismáticas apresentam uma excelente rigidez, baixas vibrações e uma elevada capacidade de carga, entretanto, também apresentam um alto coeficiente de atrito (fenômeno “*stick-slip*”), o que exclui a utilização destas guias para eixos de movimento de posicionamento que exijam certa precisão, tornando-se, entretanto uma ótima alternativa para eixos de movimentos em que não se necessite posicionar, mas que tenham que suportar elevadas cargas.

Na escolha de guias de movimento para projetos de automação de máquina devem ser consideradas as seguintes especificações: comprimento máximo disponível, velocidade máxima de trabalho, coeficiente e tipo de atrito,

capacidade máxima de carga, se necessitam algum sistema de alimentação (guias fluídicas) ou de manutenção, permitem a alteração da pré-carga, etc.

Os mancais rotativos são os elementos onde o movimento de translação em qualquer direção é zerado (proibido), deixando livre somente a rotação em torno de um único eixo de movimento. Em relação as características dos mancais para projetos de automação de máquinas, estas são as mesmas que das guias de movimentos, ou seja, uma elevada rigidez, baixa folga, não permitir outros graus de liberdade e um baixo coeficiente de atrito. Os mancais para projetos de automação de máquinas são classificados na Figura 2.12. As especificações para os mancais são as mesmas que para as guias.

### 2.6.3.2 - Transmissões mecânicas

As transmissões mecânicas são aquelas que transmitem energia e informações no sistema, alterando os valores das grandezas mecânicas associadas e alteram os tipos de movimentos (rotativo/translativo). Dentre as características principais para projeto de automação de máquinas os sistemas de transmissão devem apresentar: baixo coeficiente de atrito dinâmico e estático, folga tão reduzida quanto possível entre suas partes móveis, elevada rigidez, massa (móvel), inércia tão reduzida quanto possível, etc.

Uma possível classificação para as transmissões mecânicas é baseada segundo o tipo de função que esta executa Figura 2.13.

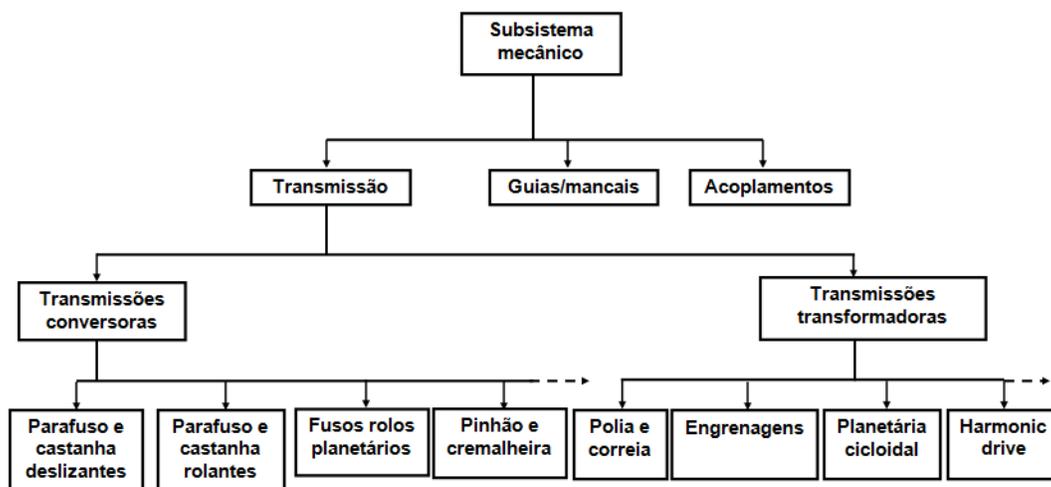


Figura 2.13 - Classificação das transmissões mecânicas.

De acordo com a Figura 2.13, o grupo funcional de transmissões conversoras tem a função de converter os movimentos rotativos em movimentos translativos e vice-versa dentro de um sistema mecânico, convertendo as grandezas físicas de um sistema nas correspondentes grandezas do outro sistema alterando-se também os valores.

As transmissões transformadoras têm a função de transformar o valor das grandezas mecânicas associadas dentro de um mesmo sistema físico (reduzir/aumentar rotações e torques, etc.).

Na escolha de transmissões para projetos de automação de máquina devem ser consideradas as seguintes especificações: percurso máximo de trabalho, velocidade máxima de trabalho, capacidade máxima de carga, relação de redução, inércia acopladas, manutenção, viabilidade para alterações para o aumento da rigidez, etc.

### 2.6.3.3 - Acoplamentos

A função dos acoplamentos é a de unir os extremos de dois mecanismos rotativos (ex: eixo do motor e eixo da transmissão), possibilitando o fluxo de energia mecânica de rotação e de informações entre os eixos mecânicos acoplados. Dentre as características principais para projetos de automação de máquinas os acoplamentos devem apresentar: máxima rigidez à torção, ausência de folgas, flexibilidade em todos os outros graus de liberdade, compensar todos os tipos de desalinhamentos existentes entre os eixos referidos (Figura 2.14).

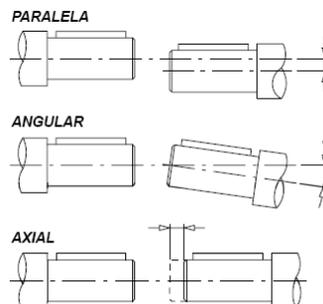


Figura 2.14 - Tipos de desalinhamento entre eixos.

A classificação dos acoplamentos mais comumente utilizados em máquinas industriais é apresentada na Figura 2.15.

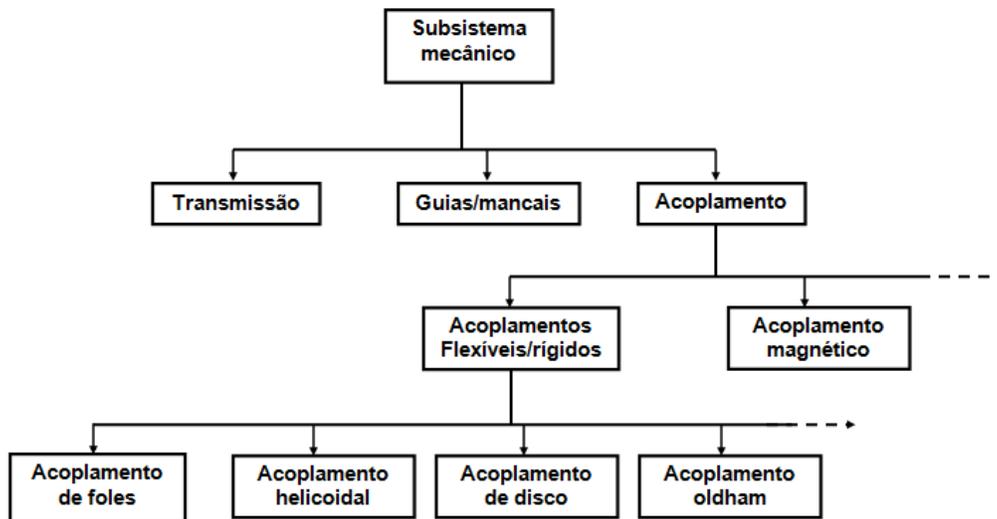


Figura 2.15 - Classificação dos acoplamentos

Na escolha dos acoplamentos para projetos de automação de máquinas devem ser consideradas as seguintes especificações: desalinhamentos máximos que suportam diâmetros mínimos e máximos para a cavidade do eixo, RPM máxima, torque máximo, tipos de desalinhamentos suportados: angulares, axial e radial, capacidade de amortecimento das vibrações entre um eixo e o outro.

#### 2.6.4 - Subsistema de medição e monitoramento

Os dispositivos de medição têm por função principal obter informações em tempo real e fornecer-las na forma eletrônica ao sistema de comando/controle, a fim de poder verificar se seus valores correspondem aos valores impostos na entrada no sistema comando/controle. Os valores de referência e os medidos são eletronicamente comparados e o resultado da comparação, o “erro”, é utilizado para corrigir via acionamentos o valor medido à saída.

Segundo Martin (2005) dentre das características principais para projetos de automação de máquinas, os transdutores devem apresentar: precisão, resolução (deve ser da ordem de 5 a 10 vezes maior do que a

resolução desejada para ser medida/monitorada), rapidez suficiente de obtenção dos valores medidos (no mínimo 10 vezes mais rápido do que a frequência natural dominante do sistema posicionador), diversas outras características facilitadoras de utilização. Como se trata de componentes na interface mecânica/elétrica dos sistemas, apresentam também características mecânica a serem consideradas na seleção para aplicações: inércias ou massa da parte móvel do transdutor, que terá que ser movimentada solidária à carga; atrito em guias próprias ou compartilhadas, estabilidade dimensional, imunidade à variações térmicas, etc.

Os transdutores podem ser classificados segundo vários critérios: Segundo o tipo de sinal: analógico ou digital. Analógico é um tipo de sinal contínuo que varia em função do tempo. Sendo sinais lidos de forma direta sem passar por qualquer decodificação complexa, pois as variáveis são observadas diretamente. Entretanto o sinal digital é um sinal com valores discretos (descontínuos) no tempo e em amplitude. Isso significa que um sinal digital só é definido para determinados instantes de tempo, e que o conjunto de valores que pode assumir é finito.

Segundo o local onde se faz a medição no sistema de automação: medição direta ou indireta. Direta significa medir a própria variável de interesse, enquanto que indireta é uma medição feita em uma variável mais facilmente acessível e que por apresentar determinada relação conhecida com a variável de interesse, permite obter seus valores através do cálculo. Também é dito observação da variável de interesse via outra ou até através de duas ou mais variáveis acessíveis.

Segundo o tipo de medição: absoluta ou incremental, o sistema de medição absoluta fornece o valor das variáveis de movimento de forma imediata sem a necessidade de algum tipo de movimento prévio. Ao contrário, o sistema de medição incremental determina a posição atual, em relação a um ponto de referência ou origem, por meio da emissão de um número de pulsos proporcional ao percurso executado, pulso que precisam ser contados para determinar a posição atual e na maioria dos casos precisa-se contar os pulsos considerando o sentido do deslocamento (positivo/negativo) o que torna a prática de processamento de sinais incrementais bem mais complicado do que a teoria, mas possível.

Existe uma variada gama de transdutores que permitem a medição da maior parte das grandezas físicas (Figura 2.16). Em automação de máquinas, variados são os tipos de sensores utilizados para monitorar as mais diversas variáveis, tais como pressão, temperatura, deformação, posição, corrente, tensão, velocidade, aceleração, torque, etc. Dentre estas variáveis as grandezas mecânicas de posição e velocidade são considerados de máxima importância em automação de máquinas.

Existe uma variedade de transdutores para medir posição, como os potenciométricos, indutivos, magnéticos, etc., mas, esta dissertação enfoca os dispositivos denominados codificadores opto-eletrônicos, que hoje em dia são os mais utilizados para automação de máquinas devido a que permitem obter alta resolução, alta precisão, com alta estabilidade de longo tempo, permitem obter várias grandezas de movimento simultâneo (velocidade, posição e aceleração) todas diretamente na forma digital, apresentam características mecânicas igualmente muito interessantes como funcionamento sem contato (sem atrito) e baixíssima inércia da parte móvel, alta imunidade a ruído em geral, formas construtivas rotativas e translativas, possibilidade de operar em muito altas e muito baixas velocidades até a total imobilidade, tudo, sem que os custos de aquisição, instalação e operação fujam do racional.

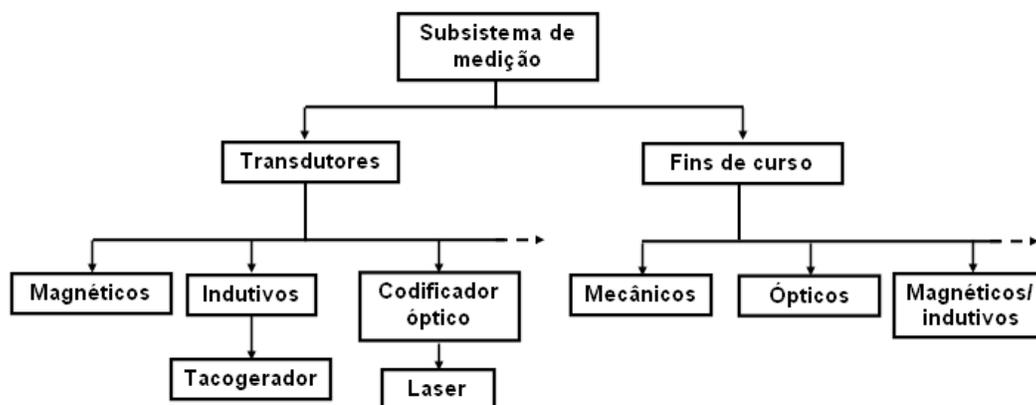


Figura 2.16 - Classificação dos sensores para automação de máquinas

Os transdutores de fim de curso têm por função evitar que eventuais falhas do sistema de posicionamento, os mesmos venham a provocar danos por choque mecânico na estrutura, também são utilizados para a função de indicador de referência de início/fim de coordenada, encontrando-se sempre

em uma posição fixa dentro do sistema e informando o final ou começo do curso do posicionador segundo algum eixo de movimento.

**2.7 - Abordagens para a pesquisa de componentes para o projeto**

Na continuação são apresentadas outras abordagens que permitirão ao projetista obter informações mais detalhadas sobre as características construtivas, dinâmicas, funcionais, dimensionais, etc. dos componentes que compõem os subsistemas das máquinas automatizadas.

Stoeterau (1999) desenvolveu o protótipo de uma máquina-ferramenta com comando numérico para usinagem de ultra-precisão, para o qual realizou uma pesquisa dos diferentes tipos de guias, mancais e transdutores mais comuns utilizados em projetos de máquinas-ferramenta. Para os tipos de guias o autor apresentou uma classificação (Tabela 2.2) segundo a forma (cilíndrica ou prismática) segundo o tipo de guia (deslizamento, rolamento, fluídicas e de elementos elásticos), com relação aos graus de liberdade destas e a sua restrição de movimento. Finalmente apresentou uma matriz comparando os diversos tipos de guias em relação aos principais requisitos funcionais utilizados na seleção de guias.

Tabela 2.2 - Classificação das guias com elementos rolantes, segundo sua forma construtiva e suas restrições (adaptado de STOETERAU, 1999)

FORMA	CILÍNDRICAS			PRISMÁTICAS	
TIPO	ABERTAS				
RESTRIÇÃO	SEM	INTERNA	EXTERNA	SEM	COM
					
Custo	BAIXO	MÉDIO	MÉDIO	ALTO	ALTO
Capacidade de carga	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA
Fabricação	FÁCIL	MÉDIA	MÉDIA	DIFÍCIL	DIFÍCIL
Rigidez	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA
Amortecimento	BAIXO	BAIXO	BAIXO	BAIXO	BAIXO
Precisão de deslocamento	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA
Desgaste	MÉDIO	MÉDIO	MÉDIO	MÉDIO	MÉDIO

Em relação aos mancais Stoeterau (1999) realizou uma classificação dos tipos de mancais, deslizantes, fluídicos, magnéticos e com elementos rolantes (esférico, cônico, agulha, barril, etc.), detalhando suas características dinâmicas e funcionais principais e realizando uma comparação entre eles.

Por ultimo, apresenta uma classificação dos sensores de posição utilizados em máquinas-ferramentas, classificando os sensores segundo seu princípio físico de funcionamento e realizando uma comparação entre eles baseando-se nos requisitos para processos de ultra-precisão: resolução, faixa de operação, repetibilidade, velocidade de medição, estabilidade durante a operação, facilidade de montagem e ajustagem e custo.

Lichtblau (1989) realizou uma contribuição ao estudo da dinâmica de posicionadores, por meio de uma pesquisa de componentes de dois dos quatro subsistemas que compõem uma máquina automatizada, subsistema mecânico: transmissões (conversoras e transformadoras), mancais/guias (deslizantes, rolamentos e fluídicas) e acoplamentos e subsistema de acionamento: servomotores e *drive*.

Burgoa (1996) implementou uma bancada de ensaios para acionamentos eletromecânicos fracionários rotativos, com a finalidade de conhecer o comportamento estático e dinâmico dos mesmos, possibilitando um apropriado acoplamento das características do acionamento com às da carga. Para isto Burgoa (1996) realizou um estudo do estado-da-arte dos componentes de uma bancada de ensaio dentro da qual apresenta também uma classificação dos acionamentos mais comuns utilizados em máquinas e principalmente em aparelhos e instrumentos automatizados, mostrando as principais características dinâmicas, funcionamentos, formas construtivas e exemplos de aplicação destes. Na Figura 2.8 é apresentada uma classificação dos acionamentos fracionários rotativos.

Além disso, Burgoa (1996) realizou um estudo do estado da arte do subsistema de medição e monitoramento realizando uma classificação dos distintos tipos de transdutores de posição explicando seu funcionamento e suas características construtivas.

## **2.8 - Considerações finais**

As informações apresentadas neste capítulo dão ao projetista uma visão abrangente dos subsistemas que compõem uma máquina automatizada (classificação, características, funções, especificações, componentes, etc.),

com o objetivo de facilitar as informações que devem ser consideradas para desenvolver e implementar projetos de automação de máquinas.

## Capítulo 3 - Metodologia para o desenvolvimento de produtos

### 3.1 - Introdução

Neste capítulo serão apresentadas as principais fases do processo de desenvolvimento de produtos e seus respectivos procedimentos, métodos e ferramentas os quais serão considerados na sistematização, que é objetivo deste trabalho.

### 3.2 - Processo de desenvolvimento de produtos

De acordo com Romano (2003), o processo de desenvolvimento de produto é entendido como a realização interativa de uma série de atividades, que têm início com a busca de necessidades no mercado, considerando estratégias competitivas, limitações tecnológicas, especificações do produto, etc., e finalizando com o lançamento e acompanhamento de um novo produto no mercado. A Figura 3.1 apresenta o modelo de PDP adaptado por Leonel (2006), com base no modelo de Romano (2003), que é apresentado na seqüência.

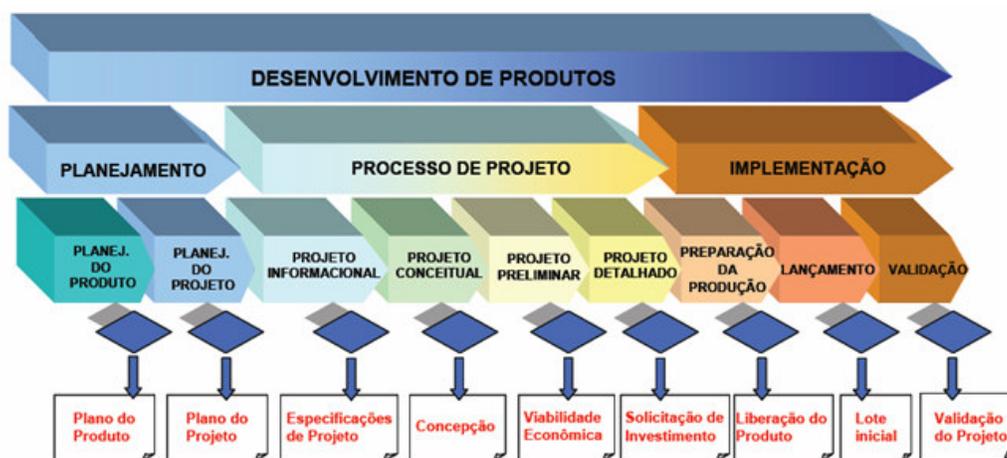


Figura 3.1 - Macro-fases e fases do processo de desenvolvimento de produto (adaptado de Romano, 2003).

De acordo com a Figura 3.1, o PDP é constituído de três macro-fases: planejamento, processo de projeto e implementação.

A macro-fase do planejamento aborda o empreendimento de um plano de projeto, motivado por uma necessidade existente no mercado, incluindo o planejamento de produto e do projeto. A macro-fase de processo de projeto envolve o desenvolvimento do projeto do produto; este processo é subdividido em quatro fases: projeto informacional, projeto conceitual, projeto preliminar e projeto detalhado, cujos resultados são: as especificações de projeto, a concepção do produto, avaliação econômica, modelagem e simulação do produto e plano de manufatura respectivamente. A macro-fase de implementação se subdivide em três fases: preparação da produção, lançamento do produto e validação, que envolve, desde a elaboração do planejamento e preparação da produção, produção, liberação do lote piloto e validação do produto.

De particular interesse nesse trabalho, incluem-se as fases iniciais do processo de desenvolvimento do produto: planejamento do produto, projeto informacional, conceitual e projeto preliminar, as quais serão descritas em detalhes na seqüência.

### **3.3 - Planejamento do produto**

O planejamento de produto busca, em essência, responder à seguinte pergunta: o que será desenvolvido em função das estratégias da organização? Para dar resposta a esta questão, deve existir uma necessidade ou uma causa que motive um produto novo ou a modificação de um produto existente dadas pelo mercado: usuários, empresas, instituições, centros de pesquisas, etc.

O objetivo do planejamento do produto é encontrar uma ou mais idéias de produtos para serem desenvolvidas, *“um produto pode apresentar-se de várias formas: descrição de características necessárias ao produto; descrição funcional do produto, descrição de seus princípios de funcionamento ou uma combinação das anteriores na forma textual, gráficas ou ambas. Em geral nessa fase do desenvolvimento do produto a idéia não é completa e deve haver um esforço no sentido de torná-la mais clara possível para apoiar o processo de decisão.”* (BACK et al., 2008).

O processo de planejar o produto (idéia de produto) consiste essencialmente em pesquisar idéias e selecionar aquelas mais promissoras, integrando a maior quantidade de informações que sejam relevantes para o projeto. Estas informações devem permitir esclarecer perguntas como: qual é o potencial da empresa para levar o projeto a cabo; que produtos existem no mercado; quais são as novas tecnologias; qual é a capacidade da concorrência. Também devem ser investigadas questões como: requisitos sócio-políticos, ambientais limites de crescimento, condições econômicas, tecnologias, flutuações do mercado, redução do ciclo de vida dos produtos, previsão de incertezas, etc. (PAHL e BEITZ, 1996).

A Figura 3.2 apresenta um processo geral de planejamento de produtos, explorando todos os fatores que possam influenciar na criação/desenvolvimento de novos produtos. Esta análise deve ser efetuada para informações internas tanto como externas da empresa. Após essa fase é necessária uma pesquisa do campo de soluções o qual deve ser explorado com o máximo de criatividade e experiência dos responsáveis. As idéias de produtos devem ser criteriosamente avaliadas e então selecionadas as mais promissoras. Selecionadas as idéias que seguirão o processo de desenvolvimento devem ser especificadas com mais detalhes.



Figura 3.2 - Etapas do planejamento da inovação de produtos (adaptado de Leonel, 2006)

### 3.4 - Projeto informacional

É a primeira fase do processo de projeto. Aqui são definidas as especificações de projeto, onde, primeiramente, são identificadas as necessidades do usuário, que posteriormente, são desdobradas em requisitos de usuários. A partir dos requisitos dos usuários são estabelecidos os

requisitos de projeto, considerando atributos: funcionais, performance, custos, ergonomia, entre outros. Conhecidos os requisitos de projeto, em conjunto com uma avaliação dos produtos disponíveis do mercado, pode-se estabelecer as especificações de projeto as quais determinarão as características que o produto deve ter e as expectativas que deve suprir. As especificações obtidas nesta fase são fundamentais para a avaliação e escolha da concepção final, já que estas avaliam se o produto atende ou não as necessidades do mercado. (PAHL e BEITZ, 1996).

As necessidades de projeto podem ser captadas através do mercado, por meio da formulação de questionários específicos, entrevistas, análise do mercado, experiências pessoais ou da empresa, consultores ou especialistas, entre outros.

As necessidades dos usuários devem ser transformadas de uma linguagem qualitativa para a uma linguagem técnica específica para projeto como, por exemplo: área, volume, massa, comprimento, força, etc. facilitando o entendimento dos problemas a serem resolvidos.

Os requisitos de projetos são características técnicas mensuráveis que o produto deve ter, indicando as possíveis alternativas técnicas que o produto deve ter, por exemplo, baixo ruído, fácil manutenção, alta precisão, baixa massa, alta rigidez, fácil montagem. Os requisitos de projeto envolvem: características técnicas, atributos mensuráveis, e orientação de quantidade.

Os atributos do produto são propriedades que outorgam ao produto características de fabricabilidade, usabilidade, confiabilidade, montabilidade, funcionabilidade, etc. Fonseca (2000) apresenta a Tabela 3.1 onde mostra os atributos típicos para sistemas técnicos que podem ser usados como apoio ao desenvolvimento dos requisitos de projeto.

As especificações de projeto devem conter informações relacionadas com características que o produto deverá ter, sendo acompanhadas de restrições financeiras, legais, funcionais, normativas de operação, específica, de qualquer elemento que a equipe determine importante deve ser inserida no documento como elemento de avaliação posterior (FONSECA, 1996).

Tabela 3.1 - Atributos típicos de produtos industriais (adaptado de Fonseca, 2000).

Classes de atributos	Atributos	Comentarios
<b>Atributos básicos</b>	Funcionalidade	Funções, operações, desempenho, eficiência
	Ergonomia	Ergonomia de uso
	Esteticidade	Aparência, estilo, cores
	Segurança	Princípios de segurança, proteção, atos inseguros
	Confiabilidade	Taxas de falhas, redundâncias
	Legalidade	Atendimento às leis de segurança, comercio
	Patenteabilidade	Inovação passível de privilegio
	Normalização	Atendimento às normas internas, de transportes e de comercio
	Robustez	Pouco sensível aos fatores do meio ambiente
	Impacto ambiental	Atende a norma ambientais, poluição, conservação
<b>Atributos do ciclo de vida</b>	Fabricabilidade	Facil, precisa e de baixo custo
	Montabilidade	Manutenção facil e econômica
	Embalabilidade	Embalagem fácil, compacta, econômica e segura
	Transportabilidade	Adequado aos meios de transporte e manipulação
	Armazenabilidade	Conservação, ambientes manipulação
	Vendabilidade	De facil venda e exposição
	Usabilidade	Fácil operação, aprendizado
	Mantenabilidade	Manutenção fácil, repida e segura
	Reciclabilidade	Produto, componente, resíduos recicláveis
	Descartabilidade	Descarte sem contaminação ou dano ao ambiente
<b>Atributos específicos</b>	Geometria	Forma, Arranjo, dimensão, espaço
	Cinematica	Movimentos, direção, velocidade, aceleração
	Forças	Direção, magnitude, frequência, rigidez, peso
	Energia	Fontes, potencia, rendimento, armazenamento
	Materiais	Propriedades física e químicas, contaminações
	Sinais	Entrada, saída, forma, apresentação, controle
	Automação	Manual, Índice de automação
	Tempo	Tempo de desenvolvimento, data da entrega

### 3.5 - Projeto Conceitual

Esta fase destina-se à procura da concepção do produto. Para atingir este propósito são realizadas diferentes tarefas, que buscam, em um primeiro momento, estabelecer a estrutura funcional do produto: atividade que envolve a definição da função global e suas subfunções. Determinadas as funções do produto, parte-se para a procura e seleção de princípios de solução que atendam de forma mais adequada as subfunções do produto. Para a seleção da concepção faz-se uma análise comparativa entre as alternativas, considerando as especificações de projeto, custos, riscos, etc. (BACK *et al*, 2008).

Um dos principais métodos empregados no projeto conceitual é o da síntese funcional. Teve a sua origem na década dos 1970, nos trabalhos de pesquisadores, tais como: Koller (1985), Pahl e Beitz (1996), Rodenacker (1991) e Roth (1982). Este método consiste em identificar a função global de um produto, baseada nas entradas, saídas e perturbações do sistema. A função global pode ser descomposta em funções parciais de menor

complexidade (Figura 3.3). A combinação das funções parciais individuais resulta em uma estrutura de funções que representam a função global.

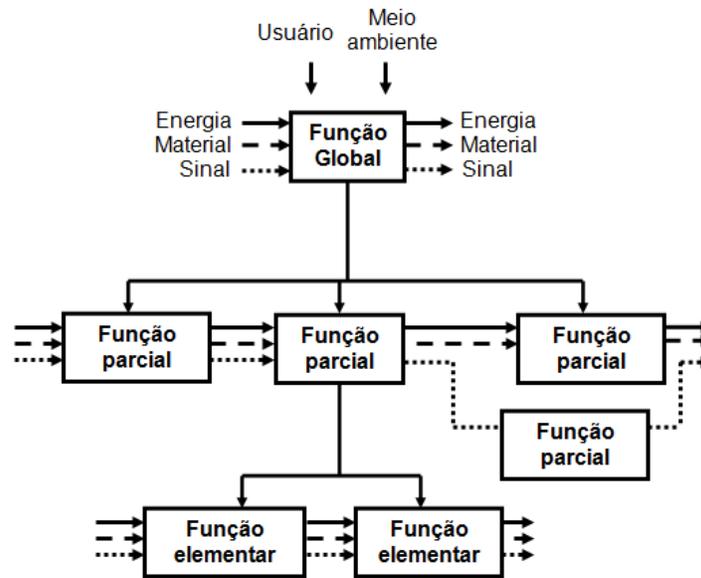


Figura 3.3 - Estrutura de funções

Outros métodos também são empregados na fase conceitual, os quais auxiliam na procura de princípios de soluções para um determinado problema.

Segundo Back *et al.* (2008) os métodos de geração de soluções podem ser divididos em dois grupos: métodos intuitivos e sistemáticos (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 - Métodos de geração de concepções

Metodos de gereção de concepções	
<b>Métodos intuitivos</b>	Brainstorming
	Brainstorming escrito
	Brainstorming eletrônico
	Método de Delphi
	Analogia direta, simbólica e pessoal
	Método sinético
	Método da listagem de atributos
	Método de instigação de questões
<b>Métodos sistematicos</b>	Método de matriz morfológica
	Ánalise de valor
	Teoria de solução inventiva de problemas- TRIZ

Dentro dos métodos intuitivos se encontra o *Brainstorming* escrito que é uma variante do *Brainstorming* tradicional. Para o procedimento é necessário

uma equipe de seis membros familiarizados com o tipo de problema a resolver e as soluções são desenhadas em uma folha que é trocada entre os membros.

O método da instigação de questões de acordo com Raudsepp (1983) utiliza uma série de palavras chaves que permitem estimular idéias para melhorar produtos. Baxter (1998) denomina o método de MESCRAL, originado, das iniciais, das palavras: Modificar; Eliminar; Substituir; Combinar; Rearranjar; Adaptar e Inverter.

O método da listagem de atributos foi desenvolvido por Robert Crawford da Universidade de Nebraska. Este método consiste em isolar e listar os principais atributos ou características de um produto, onde cada uma destas características é avaliada com o objetivo de melhorar o produto (BACK *et al.*, 2008).

Dentro dos métodos sistemáticos encontra-se a matriz morfológica a qual consiste em uma pesquisa sistemática de diferentes combinações de princípios de soluções com a finalidade de encontrar novas soluções para um determinado problema.

O procedimento de engenharia reversa (OTTO e WOOD, 2001) permite reconhecer os componentes dentro de um sistema e suas inter-relações. A engenharia reversa começa com a decomposição do nível de abstração mais elevado de um sistema (função global) até a obtenção das subfunções (funções parciais). Este método permite a busca de novos princípios de soluções para processos de implementação, inovação e melhoramento do sistema (BACK *et al.*, 2008).

Alguns dos métodos mencionados serão utilizados e referenciados como base para a sistematização proposta nesse trabalho (capítulo 4). Outros métodos de geração de soluções podem ser pesquisados na literatura, como em Back *et al.* (2008).

Após a geração de concepções as alternativas devem ser avaliadas para selecionar aquela mais promissora. Um dos principais critérios nesse processo é a viabilidade econômica.

Esta avaliação econômica pode começar com um procedimento que permite submeter todas as alternativas de produtos a uma análise de custos do ciclo de vida, através do desdobramento de custos das mesmas, identificando

as atividades a serem desenvolvidas nas diversas fases do processo de desenvolvimento do produto (BACK *et al.*, 2008).

Outros procedimentos permitem identificar as funções de alto custo observando quais são as atividades que apresentam uma alta porcentagem de contribuição nos custos do ciclo de vida do produto, baseando-se nas informações ou atividades obtidas na estrutura de desdobramentos de custos. Este procedimento permite analisar quais são as causas dos custos elevados permitindo adotar decisões que permitam reduzi-los (BACK *et al.*, 2008).

A escolha de soluções para um produto começa com a apresentação e seleção dos critérios generalizados (especificações de projeto), estabelecendo uma lista de critérios genéricos os quais permitem distinguir quais concepções de produtos cumpre com os objetivos de projeto e quais devem ser descartadas (BACK *et al.*, 2008).

Uma vez listados os critérios generalizados o método de comparação aos pares e a valoração dos critérios quantitativos e qualitativos do projeto segundo seu atendimento aos critérios (BACK *et al.*, 2008)., permitem evidenciar as melhores soluções de concepções para o projeto.

Parte dos métodos e procedimentos antes mencionados são adotados e aplicados na avaliação de custos e na seleção das concepções na sistematização (capítulo 4).

### **3.6 - Projeto preliminar**

Esta fase destina-se ao estabelecimento do leiaute final do produto e suas principais atividades, segundo Back *et al.* (2008), são: identificar as especificações de projeto; definir os componentes ou unidades de grupos existentes a ser utilizados, revisão das patentes e os aspectos legais e de segurança, estabelecimento das dimensões principais dos componentes e a estrutura, modelagem e simulação do leiaute.

Em um primeiro momento, deve-se analisar a viabilidade da concepção em um âmbito técnico e de fabricação, ou seja, analisar se os componentes ou grupos existentes utilizados na concepção estão disponíveis no mercado, podem ser desenvolvidos por fornecedores, e se a concepção atende aos aspectos legais e de segurança, etc.

Definidos os componentes, estruturas, dimensões, características, materiais, etc. da concepção do produto, para estudar seu comportamento sob determinados aspectos esta deve ser modelada com vista à simulação, ou seja, representada por meio de outros sistemas que possibilitam descrever o produto e estudá-lo conforme o interesse.

Dentro dos propósitos da modelagem inclui-se o de explicar fenômenos das teorias físicas (mecânica newtoniana, termodinâmica, etc.), realizar previsões sobre o desenvolvimento projeto no futuro, ser um meio de comunicação como fator de integração dos diversos profissionais envolvidos, etc.

Após a modelagem, o produto pode ter o seu comportamento simulado. Isso pode ser realizado de várias maneiras dependendo das variáveis a serem consideradas. Por exemplo, no caso de simulação dinâmica, pode-se empregar software como AMESim, Simulink, etc. para estudar o comportamento de variáveis como velocidade, aceleração, entre outras.

Finalizado o projeto preliminar tem-se uma solução técnica e economicamente viável que deve ser descrita para a fabricação. Assim, realizam-se as atividades de projeto detalhado para preparar a documentação do produto e liberá-la para a fabricação.

### **3.7 - Projeto detalhado**

Esta fase destina-se à construção, avaliação e aprovação do protótipo; otimização e finalização das especificações dos componentes; onde as formas geométricas, tolerâncias, dimensões, propriedades superficiais e materiais do produto e todas as suas partes individuais são completamente especificadas e expostas em desenhos de montagem, desenhos de detalhes e listas de partes, todas as instruções para o resto do ciclo de vida do sistema devem ser documentadas: produção, montagem, transporte, teste, operação, uso, manutenção, descarte\reciclagem.

Cabe destacar que esta fase não é parte do escopo do trabalho, mas segue sendo a fase precedente para a continuação do desenvolvimento de projeto de máquina.

### **3.8 - Considerações finais**

As informações apresentadas neste capítulo contribuem com o projetista na orientação seqüencial das metodologias necessárias para desenvolver o projeto de automação, oferecendo ferramentas, métodos, conceitos, procedimentos e informações aplicáveis na sistemática com o objetivo de facilitar a procura, criação, avaliação e seleção de produtos competitivos para o mercado, sob avaliação de critério técnico e econômico.

## Capítulo 4 - Sistemática para projeto de automação de máquinas

### 4.1 - Introdução

Neste capítulo será proposta uma sistemática para o projeto de automação de máquinas, começando pela análise das necessidades dos usuários até a modelagem e simulação da concepção da máquina definitiva. A sistemática é proposta em quatro fases e doze atividades, cuja estrutura é mostrada na Figura 4.1.

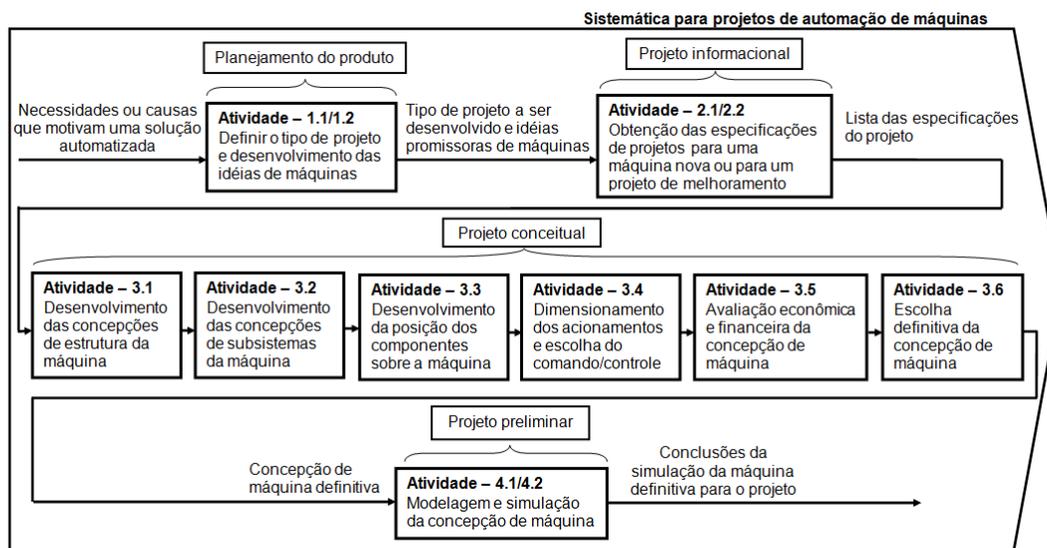


Figura 4.1 - Estrutura de atividades da sistemática para projetos de automação de máquinas.

### 4.2 - Fase I - Planejamento do produto

O planejamento do produto é constituído de duas atividades, cujo objetivo é transformar as necessidades em tipos de projetos a serem desenvolvidos e idéias promissoras. O detalhamento da fase é mostrado na Figura 4.2.

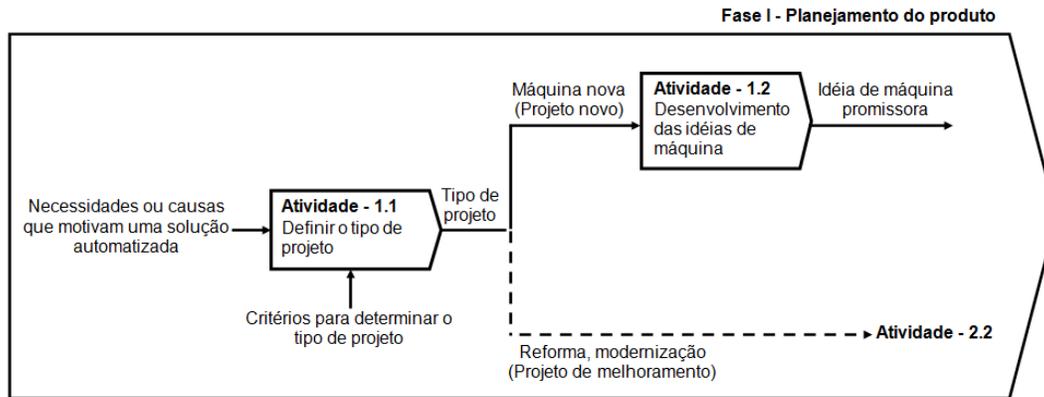


Figura 4.2 - Entradas e saídas das informações principais da fase I - planejamento de produto.

#### 4.2.1 - Atividade 1.1 - Definir o tipo de projeto

O objetivo da atividade 1.1 é definir o tipo de projeto a ser desenvolvido (projeto novo ou projeto de melhoramento). Com relação à Figura 4.2 devem-se analisar as informações que motivam o projeto de automação de máquina, e utilizando a Tabela 2.1 (capítulo 2) deve-se determinar se estas informações correspondem ao desenvolvimento de uma máquina nova ou ao projeto de melhoramento de uma máquina existente. Se o projeto for desenvolver uma máquina nova deve-se continuar na **atividade 1.2** para desenvolver as primeiras idéias de máquinas, entretanto, se o projeto for um melhoramento de uma máquina existente, conduzir o processo pela **atividade 2.2** (fase II – Projeto informacional), onde serão obtidas as especificações para o projeto de melhoramento da máquina.

#### 4.2.2 - Atividade 1.2 - Desenvolvimento das idéias de máquinas

O objetivo da atividade 1.2 é obter as primeiras idéias de máquinas para projetos, a partir das necessidades que motivam o desenvolvimento do projeto, da análise das informações do mercado, da utilização dos métodos de geração de concepções e das próprias idéias do projetista e do consumidor. A Figura 4.3 mostra o fluxo de tarefas da atividade 1.2.

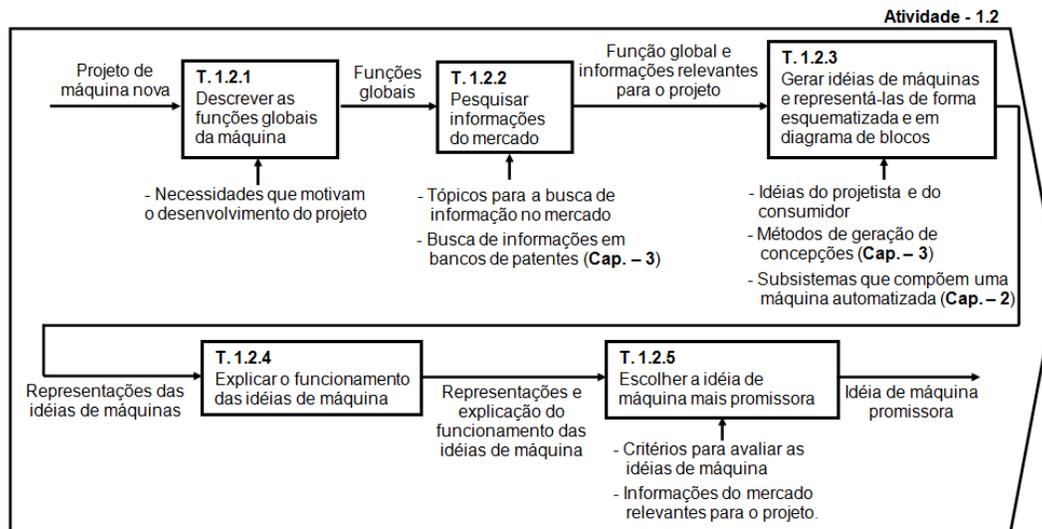


Figura 4.3 - Fluxo das tarefas da atividade 1.2.

Com relação à Figura 4.3, o usuário deve descrever as funções globais que a máquina deverá possuir, baseando-se nas necessidades que motivam um projeto de máquina nova, indicando suas entradas e saídas, tipo de grandeza a ser processada, etc. Em geral, todas as informações que permitam gerar uma primeira idéia de máquina. Por exemplo, para o projeto de uma máquina de corte, devem-se detalhar: o tipo de corte que realizara (linear, circular, etc.); tipo de material que será cortado (aço, madeira, acrílico, etc.); espessura do material (0,01m até 0,001m); tipo de ferramenta utilizada para o corte (laser, serra, etc.); dimensões da chapa a ser cortada (1x2 m); dimensões de corte 2D ou 3D, entradas e saídas da função global (energia, material, sinal), etc. As informações obtidas nesta tarefa são fundamentais para determinar o número de eixos de movimento que a máquina precisará, facilitando a obtenção das primeiras idéias de máquinas.

Em função das necessidades que motivam o projeto de máquina e as funções globais que deve executar, devem-se pesquisar informações no mercado que possam ser relevantes para desenvolvimento do projeto. Na continuação são apresentados alguns tópicos relacionados com as informações que devem ser consideradas em projetos de automação de máquinas.

- informações relacionadas com o funcionamento de máquinas similares e iguais;
- informações relacionadas com os componentes que compõem a máquina afim, considerando suas características dinâmicas, funcionais e construtivas;
- novas tecnologias aplicadas em automação de máquinas;
- fornecedores e fabricantes de componentes e máquinas similares e iguais;
- configurações de estruturas para a máquina;
- disponibilidade dos componentes, materiais e estruturas;
- custos de logística de componentes, estruturas e materiais;
- leis, normas e riscos envolvidos;
- etc.

As pesquisas destas informações podem ser realizadas por meio de revistas de automação de máquinas, catálogos de componentes, internet, congressos, artigos, visitas a fábricas, engenharia reversa aplicada a máquinas existentes, teses e dissertações relacionadas com o projeto, patentes, contato com fornecedores e fabricantes, etc. As informações obtidas podem ser ordenadas e detalhadas em tabelas que permitam manter a clareza das informações obtidas (custos, características, funcionalidades, disponibilidade dos componentes, etc.).

Para a obtenção de informações relacionadas com patentes e inovação em automação de máquinas, recomenda-se utilizar as informações oferecidas por Back *et al.* (2008) relacionadas com a busca de informações em bancos de patentes.

As primeiras idéias de máquinas podem ser geradas por meio das experiências e conhecimentos do consumidor e do projetista, procurando máquinas similares ou iguais no mercado e utilizando métodos de geração de concepções as quais permitirão criar soluções novas ou modificar soluções existentes. As idéias obtidas devem ser representadas de forma esquematizada (Figura 4.4) baseadas nos subsistemas que compõem uma máquina automatizada (subsistema mecânico, subsistema de medição, etc.) e

apresentando o número de eixos de movimentos a ser desenvolvidos com suas respectivas funções principais (sem uma estrutura definida).

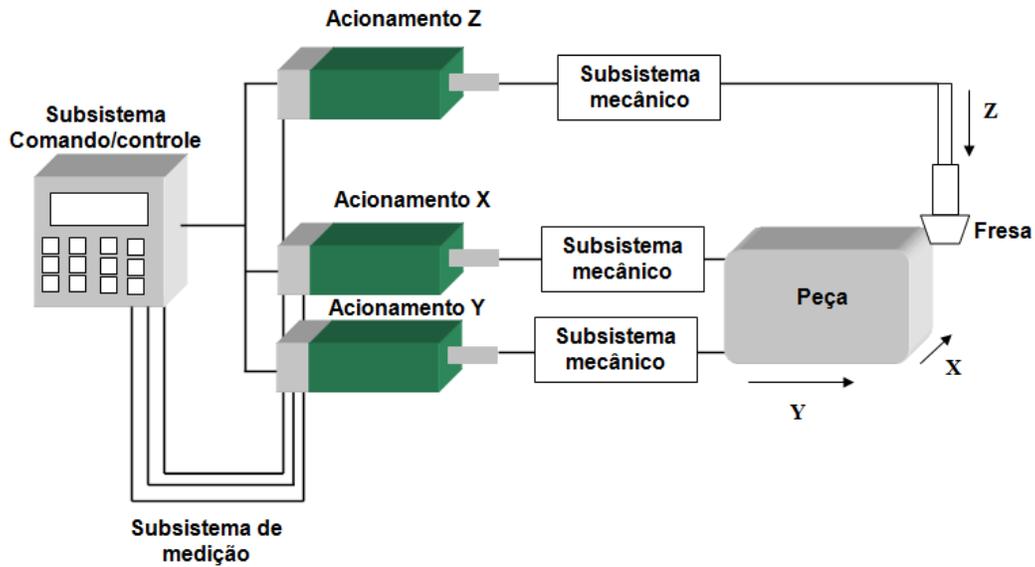


Figura 4.4 - Esquematização de uma idéia de uma máquina automatizada (fresadora).

A esquematização deve ser convertida em um diagrama de blocos o qual permite obter uma segunda perspectiva da idéia da máquina (Figura 4.5).

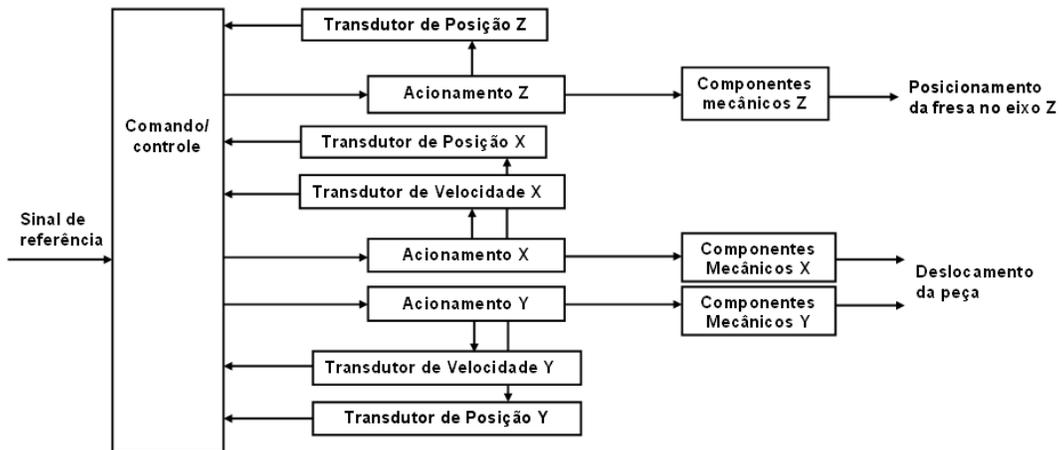


Figura 4.5 - Diagrama de blocos de uma máquina automatizada (fresadora).

Implementado as representações das idéias da máquina deve-se explicar o funcionamento destes de uma forma simples. Por exemplo, a Figura

4.5 representa uma máquina fresadora em um diagrama de blocos, na qual o subsistema de comando/controle gerencia os movimentos dos eixos X/Y interpolando o movimento deles por meio dos acionamentos e respectivos sistemas de transmissão com o fim de realizar trajetórias que permitam posicionar a peça que será fresada. Por outro lado o acionamento Z é comandado para posicionar a fresa na profundidade de corte.

Os transdutores dos eixos X e Y têm a função de monitorar a velocidade e o posicionamento da peça, esta função pode ser realizada de forma direta por meio da medição dos componentes de sistema mecânico ou de forma indireta por meio do encoder no acionamento. Os transdutores do eixo Z permitem monitorar a profundidade e a velocidade da fresa.

A atividade 1.2 termina com a escolha da idéia de máquina mais promissora segundo Cooper (1985), as decisões de seleção devem se concentrar em fatores como vantagens e superioridade de novos produtos e a vantagem econômica para o usuário final. Recomenda-se usar comitês de julgamento contando com a participação de especialistas. Podem ser utilizados os mais variados critérios de seleção como técnicos, financeiros, etc.

Estes critérios podem ser baseados nas informações do mercado (revistas, bancos de patentes, máquinas da concorrência, etc.), as quais devem dar uma visão abrangente dos produtos competitivos existentes e as tendências do mercado.

### **4.3 - Fase II - Projeto informacional**

A fase de projeto informacional é constituída de duas atividades, cujo objetivo é a obtenção das especificações de projeto para o desenvolvimento de projetos de máquinas novas (atividade 2.1) e para projetos de melhoramento de máquinas existentes (atividade 2.2). O detalhamento da fase é mostrado na Figura 4.6.

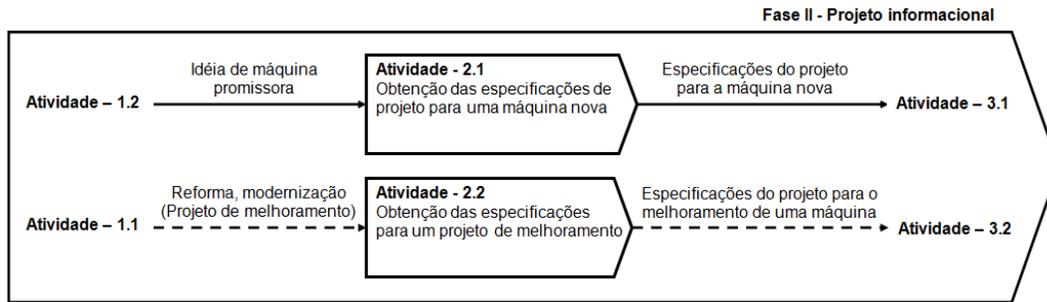


Figura 4.6 - Entradas e saídas das informações principais da fase II - projeto informacional

### 4.3.1 - Atividade 2.1 - Obtenção das especificações de projeto para uma máquina nova.

Nesta atividade serão definidas as especificações de projeto para a máquina nova por meio de um procedimento que permitirá determinar as especificações dinâmicas, estruturais, do campo de trabalho, básicas e do ciclo de vida. Estas especificações devem ser inseridas em listas de especificações, onde, se indicará quais especificações têm um caráter obrigatório e quais são somente desejáveis. A Figura 4.7 mostra o fluxo de tarefas da atividade 2.1

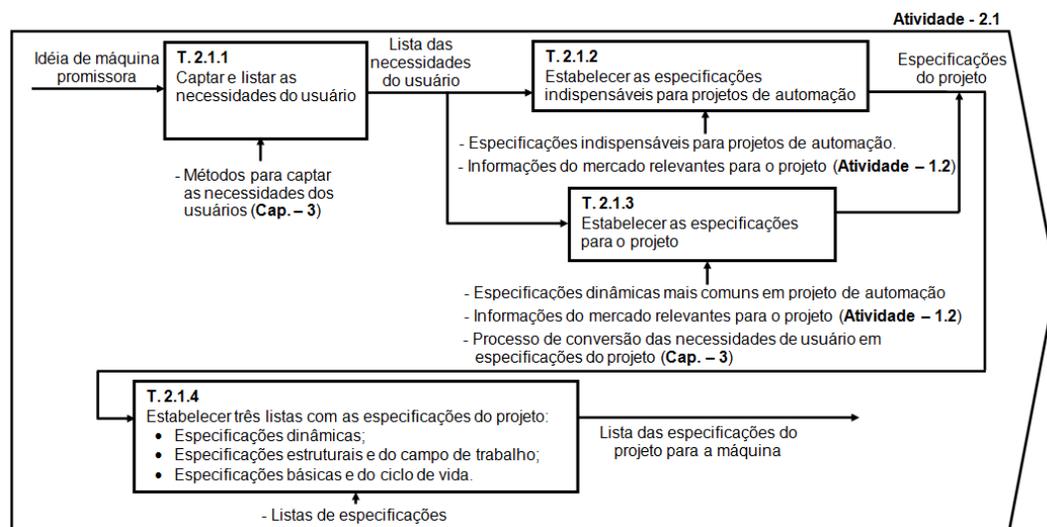


Figura 4.7 - Fluxo das tarefas da atividade 2.1.

De acordo com a Figura 4.7 as necessidades dos usuários devem ser captadas por meio dos distintos métodos disponíveis nas metodologias de desenvolvimento de produtos: entrevistas estruturadas, consultores e

especialistas, experiências de pessoas, etc. As necessidades dos usuários devem ser ordenadas e listadas para na seqüência obter as especificações de projeto.

As especificações de projeto devem ser obtidas em dois procedimentos: o primeiro consiste em estabelecer de forma quantitativa os valores das quatro especificações básicas que são indispensáveis para o desenvolvimento do projeto, que são: velocidade de trabalho, dimensões do campo de trabalho, tempo de resposta e resolução do posicionador. Estas especificações são indispensáveis no sentido que durante a sistemática estes dados são utilizados de forma obrigatória para determinar tipo de estrutura, escolher os componentes e dimensionar os acionamentos.

A velocidade de trabalho (regime permanente) é a velocidade que deve atingir o posicionador (cabeçote laser, ferramenta, cabeçote impressor, etc.) para efetuar o trabalho. A velocidade de trabalho deve ser obtida por meio da pesquisa das informações do mercado baseando-se em máquinas iguais ou similares. Por exemplo, a empresa de fabricante de laser SYNRAD (SYNRAD, 2008) permite calcular a velocidade de trabalho dependendo da espessura do material, tipo de material e potência do laser Figura 4.8.

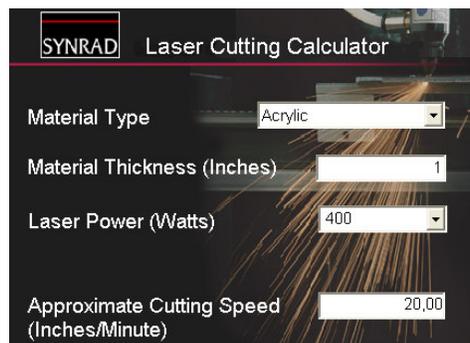


Figura 4.8 - Calculadora para obter a velocidade de corte de uma máquina laser.

As dimensões da área do campo de trabalho correspondem às alturas, comprimentos e larguras que precisa possuir a máquina para efetuar o trabalho, por exemplo, a Figura 4.9 apresenta as dimensões da área de trabalho de uma máquina laser (2x1 m).

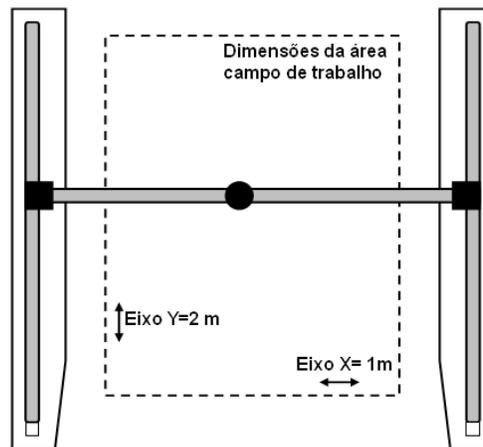


Figura 4.9 - Dimensões da área de trabalho de uma máquina laser.

O tempo de resposta (regime transitório) é o tempo que demorará um posicionador para atingir a velocidade de trabalho, deslocando-se desde seu regime estático até o seu regime permanente (velocidade de trabalho) sob uma distância pré-estabelecida. Na Figura 4.10 é apresentado o exemplo de um posicionador que tem um percurso de 0,20 m para atingir uma velocidade de 2,4 m/s. Ao conhecer a velocidade de trabalho e a distância para atingir esta velocidade é possível obter a aceleração do acionamento. Conhecendo a aceleração do acionamento é possível obter o tempo de resposta (ver exemplo no estudo de caso).



Figura 4.10 - Percurso para atingir a velocidade de trabalho.

A resolução do posicionamento indica a precisão com a que um posicionador (cabeçote laser, impressor, etc.) deve posicionar-se. Por exemplo, um sistema impressor de formato extra largo precisa uma resolução de 0,05 mm no eixo X e de 2 mm no eixo Y para posicionar o cabeçote impressor (Burgoa, 2004).

As demais especificações para o projeto (**tarefa 2.1.3**) podem ser obtidas convertendo as necessidades do consumidor em especificações de projeto, utilizando os procedimentos apresentados no capítulo 3, ramificando as especificações indispensáveis do projeto em especificações que as repercutam diretamente (Figura 4.11) e baseando-se em uma lista com as especificações dinâmicas mais comuns em projetos de automação de máquinas (Figura 4.12). Esta última lista é produto de uma pesquisa realizada nos projetos de automação de máquinas realizados no Laboratório de Hardware II /EMC/UFSC.

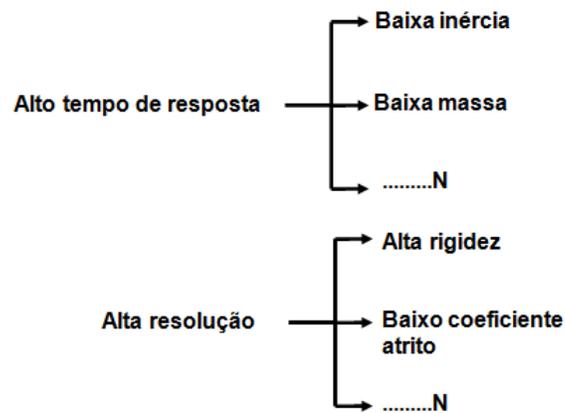


Figura 4.11 - Ramificação das especificações indispensáveis para o projeto



Figura 4.12 - Lista de especificações dinâmicas mais comuns em projeto de automação de máquinas.

As especificações de projetos obtidas neste procedimento devem ser formuladas de forma quantitativa (kg, metros, horas, etc.) ou qualitativa (cor, resistente à corrosão, etc.), determinando quais destas especificações devem ser de caráter obrigatório e quais somente são desejáveis.

As especificações de projeto devem ser inseridas em três listas de acordo com o contexto: especificações estruturais e do campo de trabalho; especificações dinâmicas e especificações básicas e do ciclo de vida.

Na continuação são apresentados dois exemplos de lista das especificações de projeto. Na Tabela 4.1 é apresentada uma lista com as especificações dinâmicas do projeto, onde os valores metas (ultima coluna) são inseridos de forma quantitativa e qualitativa e são distintos para o eixo X e Y, devido a que suas especificações dinâmicas são distintas. Os valores O/D (segunda coluna) determinam se as especificações são obrigatórias ou desejáveis, respectivamente. A Tabela 4.2 apresenta uma lista com as especificações básicas e do ciclo de vida do projeto; os dados são inseridos de forma similar a tabela anterior.

Tabela 4.1 - Exemplo de lista de especificações dinâmicas para um projeto de automação de máquina.

UFSC		Lista de especificações dinâmicas	Idéia máquina I
Data	O/D	Especificações	Meta
		<b>1.- Especificações para o eixo X</b>	
9/03/2009	O	Velocidade de trabalho	> 0,208 m/s
9/03/2009	O	Aceleração	>0,216 m/sg <sup>2</sup>
9/03/2009	O	Resolução	>0,01mm
9/03/2009	D	(-) Massa	Menor possível (kg)
9/03/2009	D	(-) Inercia	Menor possível (kgm <sup>2</sup> )
9/03/2009	D	(-) Folga	Menor possível (mm)
9/03/2009	D	(+) Rigidez	Maior possível (nm)
9/03/2009	D	(-) Atrito	Menor possível
9/03/2009	D	(-) massa translativa	Menor possível (kg)
		<b>2.- Especificações para o eixo Y:</b>	
9/03/2009	O	Velocidade de trabalho	> 0,408 m/s
9/03/2009	O	Aceleração	>0,516 m/sg <sup>2</sup>
9/03/2009	O	Resolução	>0,001mm
9/03/2009	D	(-) Massa	Menor possível (kg)
9/03/2009	D	(-) Inercia	Menor possível (kgm <sup>2</sup> )

Tabela 4.2 - Exemplo de lista de especificações básicas e do ciclo de vida para um projeto de automação de máquina.

UFSC		Lista de especificações básicas e do ciclo de vida	Idéia de máquina I
Data	O/D	especificações	Meta
<b>1.- Básicas</b>			
15-03-2009	D	Segurança	Maior possível
15-03-2009	D	Robustez	Maior possível
16-03-2009	D	Adequada estetica	Qualitativa
15-03-2009	D	Impacto ambiental	Menor possível
<b>2.- Ciclo de vida</b>			
16-03-2009	D	(-) Mínima manutenção	Menor possível (tempo)
16-03-2009	D	(-) Baixa complexidade de fabricação	Menor possível (tempo)
16-03-2009	D	(-) Baixa complexidade funcional (baixa dinâmica)	Menor possível (tempo)
16-03-2009	D	(-) Tempo de montagem da estrutura	Menor possível (tempo)
16-03-2009	D	(-) Viabilidade técnica dos componentes	Maior possível (unidade)
16-03-2009	D	(-) Custos dos componentes	Menor possível (Reais)

**4.3.2 - Atividade 2.2 - Obtenção das especificações para um projeto de melhoramento.**

Nesta atividade é apresentado um procedimento que permite obter as especificações para o projeto de melhoramento de uma máquina existente. As especificações serão obtidas por meio da análise das necessidades do usuário, do estado em que se encontre a máquina e com relação às características funcionais, construtivas e dinâmicas dos componentes. A Figura 4.13 mostra o fluxo de tarefas da atividade 2.2.

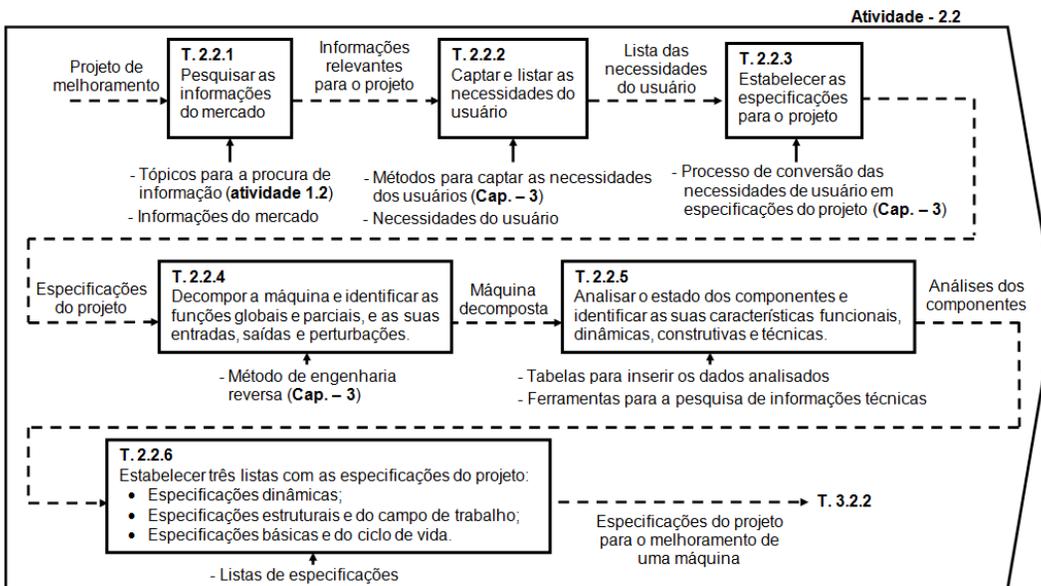


Figura 4.13 - Fluxo das tarefas da atividade 2.2.

Em relação à Figura 4.13 devem-se pesquisar todas as informações que sejam relevantes para o projeto de melhoramento da máquina: história e manual da máquina, procedência, marca, modelo, fabricantes, fornecedores da máquina, componentes que a compõem, máquinas iguais ou similares, etc. Para a pesquisa de informações podem ser utilizados como guia os tópicos apresentados na atividade 1.2.

As necessidades dos usuários devem ser captadas por meio dos distintos métodos disponíveis nas metodologias de desenvolvimento de produtos: entrevistas estruturadas, consultores e especialistas, experiências de pessoas, etc. As necessidades dos usuários devem ser ordenadas, listadas e convertidas em especificações de projetos com o procedimento apresentado no Capítulo 3.

Na continuação na continuação na tarefa **T.2.2.4** deve-se decompor a máquina que será melhorada. Para isto as especificações de projeto (necessidades do usuário convertidas) permitem saber que seções da máquina devem ser alteradas evitando desmontá-la toda. A máquina pode ser decomposta nos níveis apresentados no seguinte exemplo (Figura 4.14), identificando as funções globais, parciais e elementares da máquina, entradas, saídas e perturbações externas de cada um dos eixos da máquina, até o desmembramento dos componentes que compõem a máquina.

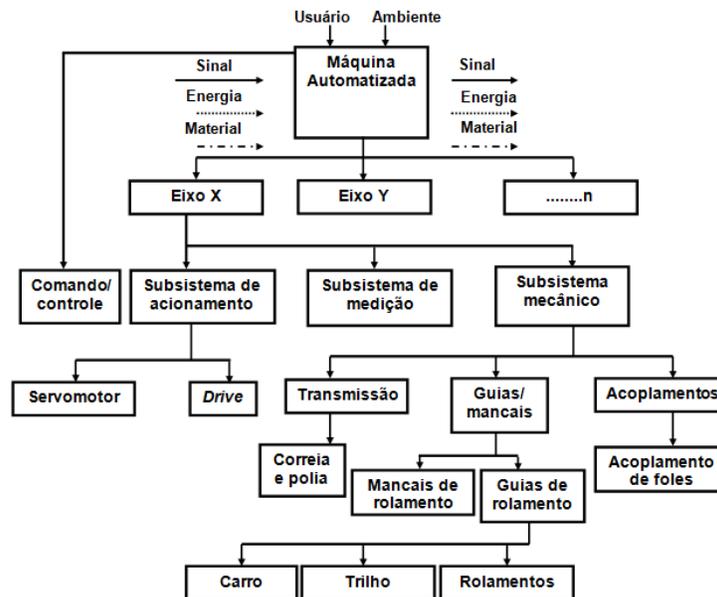
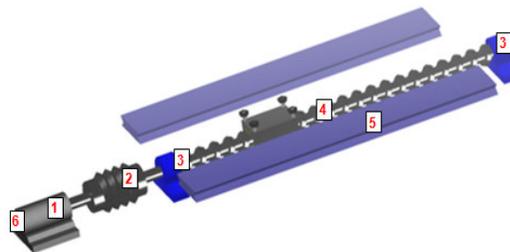


Figura 4.14 - Desdobramento de uma máquina automatizada.

Uma alternativa para decompor a máquina é o método da engenharia reversa definido por Otto e Wood (2001) o qual permite identificar os componentes dentro de um sistema e suas inter-relações, começando a decomposição do nível de abstração mais elevado do sistema (função global) para conseqüentemente obter as funções parciais e elementares.

Finalizada a decomposição da máquina, na tarefa **T.2.2.5** devem-se analisar as características funcionais, dinâmicas e construtivas dos componentes e avaliar o estado em que estes se encontram. A Figura 4.15 apresenta um modelo de como identificar e ordenar as informações dos componentes que compõem um eixo de uma máquina e a interação destes no sistema, e a Tabela 4.3 apresenta uma alternativa para inserir as informações relacionadas com os dados técnicos dos componentes.



Subsistemas	Nº	Componentes	Descrição
Acionamento	1	Acionamento	Converter a energia elétrica em energia mecânica com movimento angular
Mecânico	2	Acoplamento	Transmitir a energia mecânica desde o acionamento ao fuso da transmissão
	3	Mancais	Permitir só o movimento angular do fuso da transmissão
	4	Transmissão	Converter a energia mecânica com movimento angular em energia mecânica com movimento translativo para deslocar a mesa de trabalho
	5	Guias	Permitir o movimento da mesa de trabalho num grau de liberdade e suportar cargas desta
Medição	6	Transdutor	Medir a posição e velocidade da mesa

Figura 4.15 - Componentes que compõem o eixo da máquina e a inter-relação funcional

Tabela 4.3 - Dados técnicos dos componentes que compõem o eixo da máquina.

Especificações técnicas dos componentes					
<b>Maquina: Centro de usinagem (LMP)</b> <b>Eixo X: Posicionador mesa de trabalho</b>					
<b>Acionamento</b>		<b>Transmissão</b>		<b>Mancais</b>	
Torque	Especificações	Passo do fuso	Especificações	Coef atrito	Especificações
Potência		Massa	8mm	Diametro rolamento	Desprezível
RPM		Diametro do fuso	10 kg	Massa	
Constante tensão		Comprimento do fuso	40 mm	Material	
Constante corrente		Material	550 mm		
Inércia		Inércia	Ferro		
Massa		RPM máxima			
Resistência		Coef. atrito da castanha	3000 RPM		
			Desprezível		
<b>Acoplamento</b>		<b>Flange</b>		<b>Guias</b>	
Massa	Especificações	Massa	Especificações	Massa	Especificações
Inércia	10 kg		1 kg	Coef. Atrito	0,01
	0.0002 kgm2			Pre-carga	0
<b>Transdutor</b>		<b>Mesa de trabalho</b>		<b>Usinagem</b>	
Velocidade de monitorio	Especificações	Massa	Especificações	Força usinagem	Especificações
Faixa de leitura		Carga máxima	250 kg	Força usinagem sobre as guias	2250 N
Resolução de leitura			600 kg		1250 N

Em muitas ocasiões, os dados técnicos dos componentes que compõem a máquina não estão disponíveis. Entretanto existem ferramentas e técnicas que permitem contribuir na pesquisa destas informações. Softwares CAD permitem reconstruir peças ou componentes em 3D, com a geometria e a densidade do material idêntico ao original, permitindo obter dados da massa, inércia, centro de massa dos componentes (Figura 4.16).

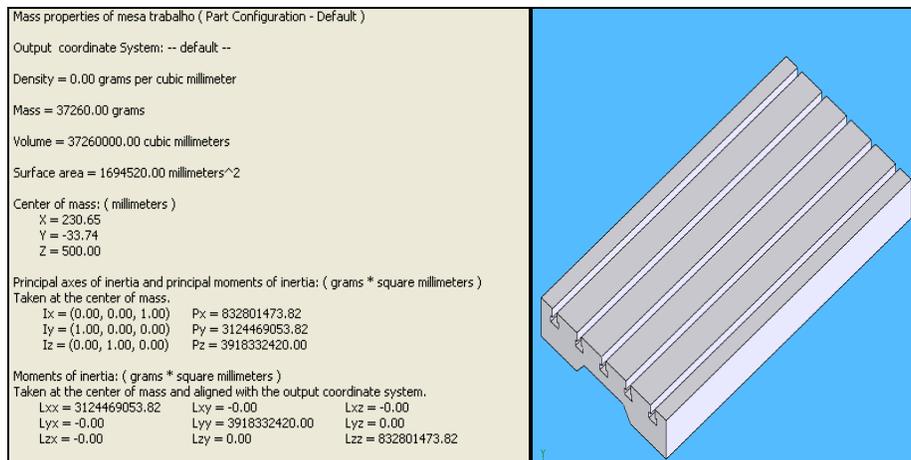


Figura 4.16 - Componentes desenhados em Solidworks.

Brenes (1994) apresenta um procedimento que permitem obter medições estáticas das máquinas para projetos de melhoria, podendo se

medir parâmetros como a histerese, rigidez, frequência natural e as curvas características do atrito.

Para o desenvolvimento do projeto, também outras tabelas podem ser implementadas com o objetivo de inserir as outras informações. Por exemplo, tabelas que permitam ordenar e listar o estado dos componentes ou peças que devem ser mantidas, concertadas ou trocadas produto de desgastes, desalinhamento, corrosão ou simplesmente porque não atendem as exigências dinâmicas da máquina.

Todas as informações relacionadas com a análise dos componentes (trocas, concertos, modificações nos componentes) e as necessidades dos usuários convertidas em especificações de projeto devem ser inseridas em listas de especificações idênticas às apresentadas na atividade 2.1 (Tabela 4.1 e Tabela 4.2).

#### 4.4 - Fase III - Projeto conceitual

A fase de projeto conceitual é constituída de seis atividades, cujo objetivo é a obtenção da concepção de máquina definitiva para projetos de máquinas novas como para projetos de melhoramento de máquinas existentes. O detalhamento desta fase é mostrado na Figura 4.17.

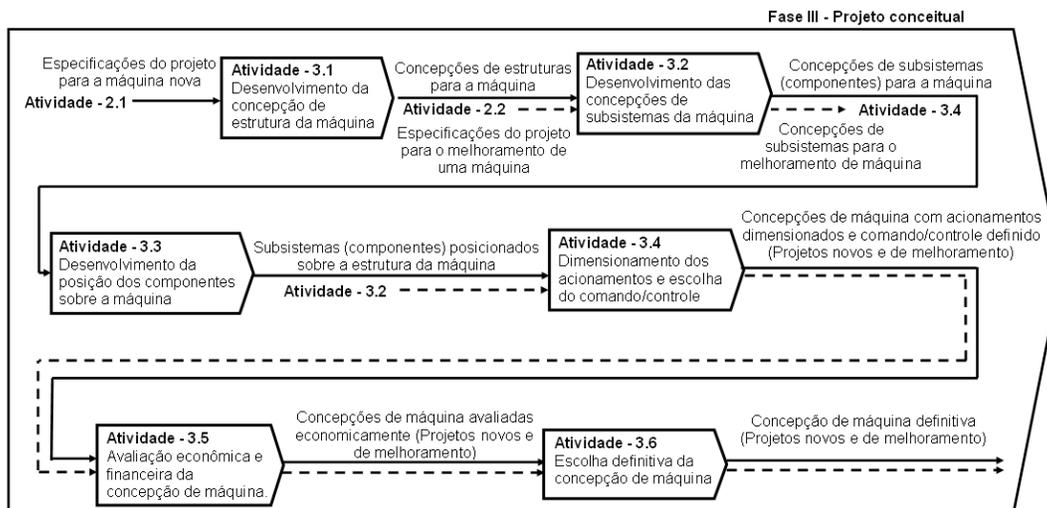


Figura 4.17 - Entradas e saídas das informações principais da fase III - projeto conceitual.

#### 4.4.1 - Atividade 3.1 - Desenvolvimento da concepção de estrutura da máquina

Nesta atividade é apresentado um procedimento que permite obter as concepções de estruturas para a máquina. Este procedimento é desenvolvido por meio da pesquisa de estruturas de máquinas existentes, ou gerando estruturas inovadoras utilizando métodos de geração de concepções. A Figura 4.18 mostra o fluxo de tarefas da atividade 3.1.

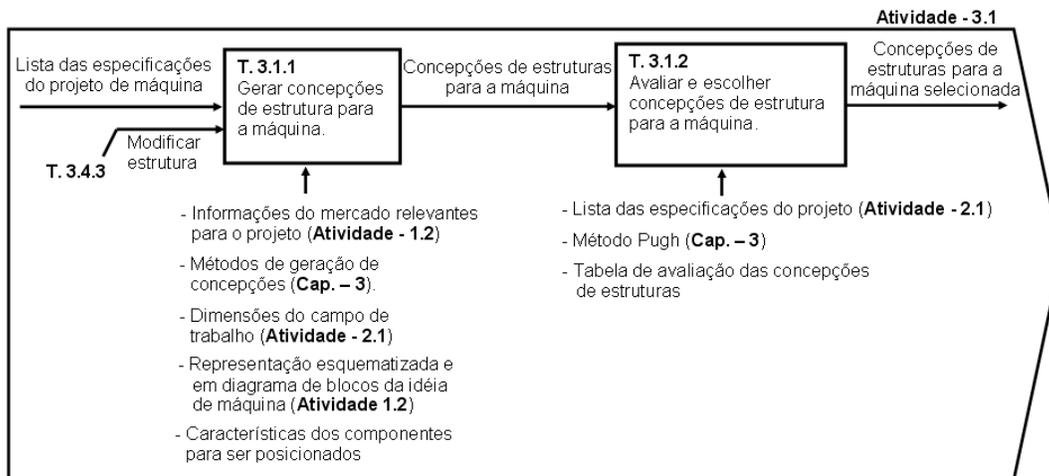


Figura 4.18 - Fluxos das tarefas da atividade 3.1.

Em relação à Figura 4.18 as concepções de estrutura para a máquina, podem ser geradas por meio da pesquisa de estruturas de máquina iguais ou similares que se encontrem no mercado ou por meio da utilização de métodos de geração de concepções que permitam criar estruturas inovadoras ou modificar estruturas existentes.

A Figura 4.19 apresenta um conjunto de concepções de estruturas para uma máquina automatizada, estas estruturas são produto da utilização do método de geração de concepções *Brainstorming* escrito, na qual um conjunto de pessoas familiarizados com o tema desenham concepções de estruturas de forma individual em uma folha, e na seqüência dão a folha ao membro de ao lado para que este acrescente as concepções ou crie outras novas. Este ou outros métodos de geração de concepção podem ser utilizados para a geração de concepções de estrutura para a máquina.

Ao desenhar as concepções de estruturas para a máquina deve-se considerar de forma obrigatória as seguintes informações: esquematizações da idéia de máquina (**atividade 1.2**), informação que estabelece a quantidade de eixos da máquina e como deve ser efetuada a função global, e as dimensões do campo do trabalho (**atividade 2.1**), informação que permitirá projetar a estrutura sobre as dimensões do campo de trabalho.

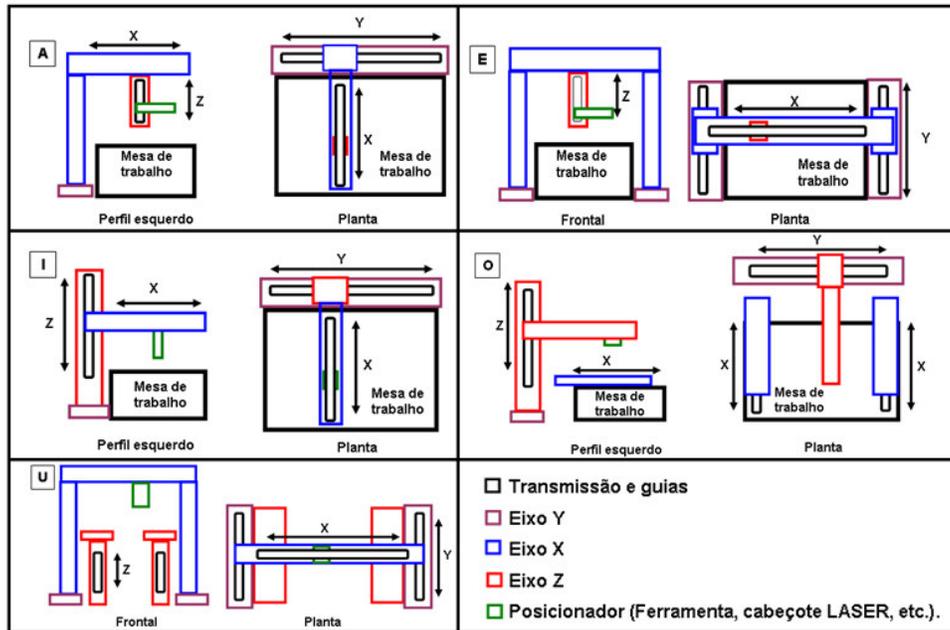


Figura 4.19 - Concepções de estruturas para a máquina. Fonte: Autor

Outra forma de gerar concepções de estruturas é baseando-se nas características que apresentam os componentes da transmissão para ser posicionados (Figura 4.20). Estas informações podem abrir novos campos na inovação de estruturas para as máquinas.

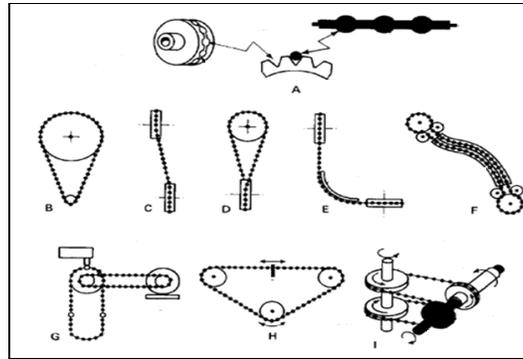


Figura 4.20 - Alternativas para posicionar uma transmissão (adaptado de Sandin, 2003).

As concepções de estruturas devem ser avaliadas e selecionadas, descartando as estruturas cuja configuração seja um impedimento para o atendimento das especificações de projeto ou porque a sua configuração afeta de forma negativa o funcionamento ou a dinâmica da máquina. Na Tabela 4.4 é apresentado um exemplo onde são avaliadas as estruturas apresentadas na Figura 4.19. Durante esta avaliação foram descartadas as concepções de estrutura O e U por não atender as especificações exigidas. As concepções de estruturas que atendem às especificações passarão à atividade seguinte.

Tabela 4.4 - Avaliação e seleção das concepções de estrutura.

O = Atende      X = Não atende		Avaliação das concepções de estrutura				
Especificações	Concepção A	Concepção E	Concepção I	Concepção O	Concepção U	
Atende às dimensões máximas (2,5m x 2,5m x 2,5m) de espaço	0	0	0	<del>X</del>	<del>X</del>	
Atende a uma baixa complexidade de fabricação	0	0	0	<del>0</del>	<del>0</del>	

Outro método recomendado para avaliar as concepções de estruturas é o método Pugh. Este método permite identificar as melhores concepções de estrutura, em relação a uma estrutura de referência (estruturas da concorrência, de máquinas similares, etc.). Para utilizar este método deve se escolher um conjunto de especificações de projeto (critérios) que permitam ressaltar as diferenças entre as concepções de estrutura (vantagens e

desvantagens) os quais devem ser introduzidos na primeira coluna da Tabela 4.5, sendo todos os critérios considerados de igual importância ou peso.

A estrutura de referência deve ser colocada na primeira coluna das concepções de estruturas, seguida das demais concepções de estruturas nas outras colunas.

A valoração das concepções de estruturas devem se efetuar por consenso dos participantes emitindo os seguintes conceitos: (+) se a concepção de estrutura A atende melhor ao critério X que a concepção de estrutura de referência, Se a concepção de estrutura de referência atende melhor (-) ou (0) se atendem da mesma forma.

Tabela 4.5 - Exemplo de avaliação entre concepções de estruturas “método Pugh”.

Avaliação das concepções de estruturas "Método Pugh"					
Nº	Critérios	Concepção de estrutura de referência	Concepção de estrutura A	Concepção de estrutura E	Concepção de estrutura I
1	(+) Otimização espaços	0	0	0	0
2	(-) Massa total	0	0	+	+
3	(-) Massa Translativa	0	-	0	0
5	(+) Estabilidade da estrutura	0	-	-	-
6	(+) Rigidez	0	+	-	-
7	(-) Quant.de componentes	0	-	-	0
8	(-) Quant. peças da estrutura	0	+	+	+
9	Facil montagem da estrutura	0	+	-	-
	Soma de (+)	0 (+)	3(+)	2(+)	2(+)
	Soma de (-)	0(-)	3(-)	4(-)	3(-)
	Soma de (0)	9(0)	2(0)	2(0)	3(0)
	Resultado final	0 (+)	0(+)	2(-)	1(-)

Os critérios utilizados na avaliação devem ser definidos pelo projetista baseando-se nas especificações de projeto. As concepções de estruturas mais promissoras devem ser utilizadas na próxima atividade.

#### 4.4.2 - Atividade 3.2 - Desenvolvimento das concepções de subsistemas da máquina

Nesta atividade é apresentado um procedimento que permite obter as concepções de subsistemas (componentes) para os eixos da máquina. Este procedimento é realizado por meio de métodos que permitem a procura, análise, escolha e combinação dos componentes (princípios de solução) que atendem às especificações de projeto. A Figura 4.21 mostra o fluxo de tarefas da atividade 3.2.

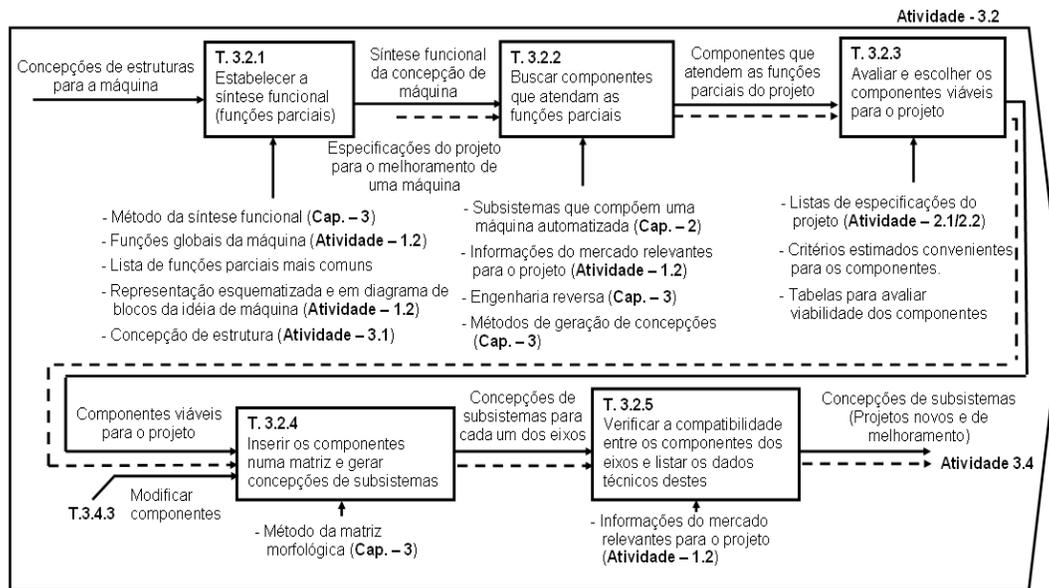


Figura 4.21 - Fluxo das tarefas da atividade 3.2.

Em relação à Figura 4.21, deve-se estabelecer a síntese funcional da concepção de máquina. A síntese funcional consiste em identificar a função global de um produto, baseada nas entradas, saídas e perturbações do sistema. A função global pode ser descomposta em funções parciais de menor complexidade. Para projeto de automação de máquinas a função global da máquina obtida na **atividade 1.2**, a qual deve-se descompor nas funções globais de cada um dos eixos que a compõem. A partir das funções globais dos eixos devem ser obtidas as funções parciais as quais devem complementar a função global do eixo (Figura 4.22).

Para esta tarefa devem-se utilizar as representações esquematizadas e em diagramas de blocos da idéia de máquina (**atividade 1.2**) e a concepção de estrutura escolhida na **atividade 3.1**. Com o objetivo de auxiliar ao projetista neste processo, a Tabela 4.6 apresenta uma lista com as funções parciais mais comuns em projetos de automação de máquinas.

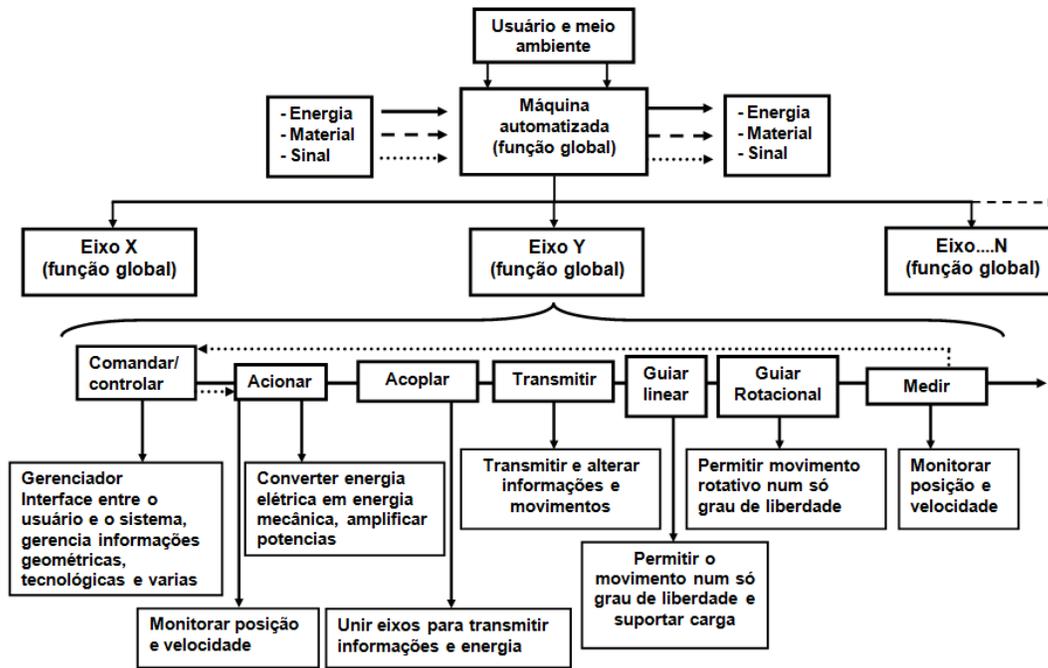


Figura 4.22 - Função global da máquina decomposta nas funções globais de cada um dos eixos e decomposição do eixo Y em funções parciais.

Tabela 4.6 - Lista das funções comuns em máquinas automatizadas.

Funções comuns em máquinas automatizadas
Comandar/controlar
Acionar
Acoplar
Reduzir
Transmitir
Guiar linear
Guiar rotacional
Medir

Na continuação devem ser pesquisados componentes (princípios de solução) que atendam as funções parciais dos eixos. Estes componentes podem ser obtidos das informações do mercado (**atividade 1.2**). A gama de componentes pode ser extremamente variada segundo sua forma construtiva, tipo, etc. Por exemplo, a Figura 4.23 apresenta a ramificação das guias rolantes em função de suas características construtivas.

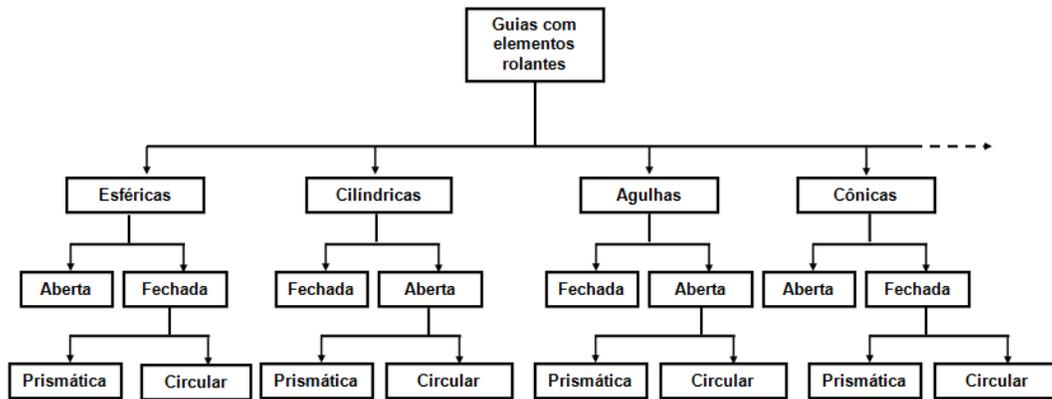


Figura 4.23 - Classificação das guias com elementos rolantes.

Métodos de geração de concepções também podem ser utilizados para a procura de novos componentes (princípios de soluções) ou para melhorar os já existentes. Na continuação são apresentados dois exemplos de métodos de geração de soluções aplicados à procura de princípios para projetos de automação de máquinas.

O método de instigação de questões (MESCRAI) originado das iniciais, das palavras chaves: Modificar; Eliminar; Substituir; Combinar; Rearranjar; Adaptar e Inverter permite ativar ou estimular idéias que ajudam a criar ou melhorar os componentes que vão compor projetos de automação de máquina. Por exemplo, este método pode ser aplicado em um sistema de transmissão de polia e correia, que requer as seguintes exigências: alta precisão, baixa inércia e alta rigidez. Os resultados destes são:

- **Adaptar ou modificar** o tipo de correia da polia pode permitir atingir uma maior precisão do posicionador;
- Se o problema for reduzir a massa do sistema de transmissão pode **eliminar** massa das polias usando rebaixas, **modificar** os diâmetros das polias ou **substituir** o tipo de material das polias por outro mais leve;
- **Adaptar** outra correia paralela à existente no sistema de transmissão ou **adaptar** um tensor de correia, permitem atingir uma maior rigidez no sistema.

O método da listagem de atributos consiste em isolar e listar os principais atributos ou características de um produto para que cada uma destas características possa ser avaliada com o objetivo de melhorar o produto, na Tabela 4.7 são apresentados uns exemplos deste método aplicado a projeto de automação de máquinas.

Tabela 4.7 - Exemplo da utilização do método de listagem de atributos

Atributos de um acionamento	Atributos para o melhoramento dinâmico do acionamento
Carcaça quadrada	Furar carcaça, diminuindo a massa e melhorando a temperatura interna do acionamento.
Eixo do acionamento	diminuir o raio do eixo do acionamento para diminuir a inércia, e alongar este para não alterar o torque
Bobinas	Colocar bobinas maiores para aumentar o torque
Ímã	

Atributos de um sistema de transmissão polia/correia	Atributos para o melhoramento dinâmico do sistema de transmissão polia/correia.
Polias	Trocar material da polia (reduz inercia).
	Mudar raios das polias (aumentar torque).
Correia dentada	Trocar a correia por uma corrente (aumenta rigidez)
	Mudar tipo de contato entre a polia e a correia (diminuir o atrito)
	Montar um tensor para a correia (aumentar a rigidez)

Outro método que poder ser utilizado para a procura de componentes, é o método de engenharia reversa (OTTO e WOOD, 2001), o qual consiste na desmontagem de máquinas similares e iguais, para sua eventual análise e procura de novos princípios de soluções.

Para determinar a viabilidade dos componentes para o projeto estes devem ser analisados sob os seguintes critérios: atender as funções parciais dos eixos da máquina, atender as especificações de projeto, ter compatibilidade dimensional com a estrutura da máquina, atender outras características que o projetista ou o consumidor estime necessárias (ex: não possuir sistema de refrigeração, não requerer de manutenção, não requerer de alguma fonte de alimentação, etc.). A Tabela 4.8 apresenta uma alternativa para avaliar os componentes; neste exemplo pode-se observar que as guias com elementos rolantes atendem de melhor forma as especificações do projeto.

Tabela 4.8 - Exemplo da avaliação das famílias de guias para o projeto.

O = Atende      X = Não atende		Avaliação das guias			
Especificações	Guias deslizantes	Guias rolantes	Guias fluidicos	Guias magneticas	
Velocidade de trabalho > 0,208m/s	0	0	0	0	
Alta dinâmica	X	0	0	0	
Sem sistema de refrigeração	0	0	0	X	
Sem fonte de alimentação	0	0	X	X	
Não requiere manutenção	0	0	X	X	
Folga mecânica quase nula	X	0	0	0	
Atende as dimensões do campo de trabalho	0	0	0	0	

Na continuação deve-se implementar uma matriz morfológica para cada uns dos eixos da máquina. A matriz morfológica é um método sistemático que permite obter concepções por meio da combinação dos componentes (princípios de solução) que preenchem a matriz.

A Tabela 4.9 apresenta o exemplo de uma matriz morfológica, onde, na primeira coluna da matriz devem ser inseridas as funções parciais dos eixos, nas colunas centrais, com o nome de princípio de solução, devem ser inseridos todos os componentes viáveis para o projeto obtidos na **Tarefa 3.2.3**, e nas ultimas colunas devem ser inseridos os componentes obtidos por meio da aplicação do método de engenharia reversa (OTTO e WOOD, 2001) e pela utilização dos métodos de geração de concepções.

Tabela 4.9 - Matriz morfológica com de soluções para o eixo de uma máquina.

Matriz morfológica para um eixo						
Funcionalidades	Princípio de solução 1	Princípio de solução 2	Princípio de solução 3	Princípio de solução 4	Metodo de geração de concepções	Engenharia reversa
Acionar	S2	S12	S22	S32	S42	S52
Acoplar	S3	S13	S23	S33		S53
Reduzir	S4	S14	S24	S34	S44	
Transmitir	S5	S15				S55
Guiar	S6	S16	S26	S36	S46	
Monitorar	S7	S17	S27			S57

Concepção 1

Concepção 2

Uma vez preenchida a matriz morfológica, devem-se gerar combinações adotando um princípio de solução por cada linha (Tabela 4.9), obtendo assim um número variado de concepções de subsistemas para o eixo da máquina.

Muitas das combinações de concepções dos subsistemas obtidos na matriz morfológica podem ser eliminadas de imediato por não serem compatíveis ou viáveis. As concepções de subsistemas viáveis serão submetidas a um processo mais criterioso de avaliação e valorização nas próximas atividades.

Cabe-se destacar que ao momento de obter as concepções dos subsistemas para cada um dos eixos da máquina, deve se detalhar os dados técnicos e características dos componentes, por exemplo, cargas máximas, torque, dimensões, velocidades, diâmetros dos eixos, etc. todas as informações possíveis que facilitem os processos das atividades futuras.

Dos subsistemas que compõem uma máquina automatizada, o subsistema comando/controle será escolhido na **atividade 3.4**, já que nesse instante serão conhecidas quase todas as características definitivas da concepção de máquina.

Os acionamentos podem ser escolhidos nesta atividade de acordo às especificações existentes (tempo de resposta, resolução, etc.), mas o valor do torque do acionamento só será definido na **atividade 3.4**, isso implica que nessa atividade se avaliará se o acionamento é compatível com o torque exigido ou deve ser procurada outra solução.

#### **4.4.3 - Atividade 3.3 - Desenvolvimento da posição dos componentes sobre a máquina**

Nesta atividade é apresentado um procedimento que permitira posicionar os componentes sobre a estrutura da máquina, definir as dimensões da estrutura e modelar a máquina em um *software* CAD para verificar a compatibilidade de movimento entre os eixos. A Figura 4.24 mostra o fluxo de tarefas da atividade 3.3.

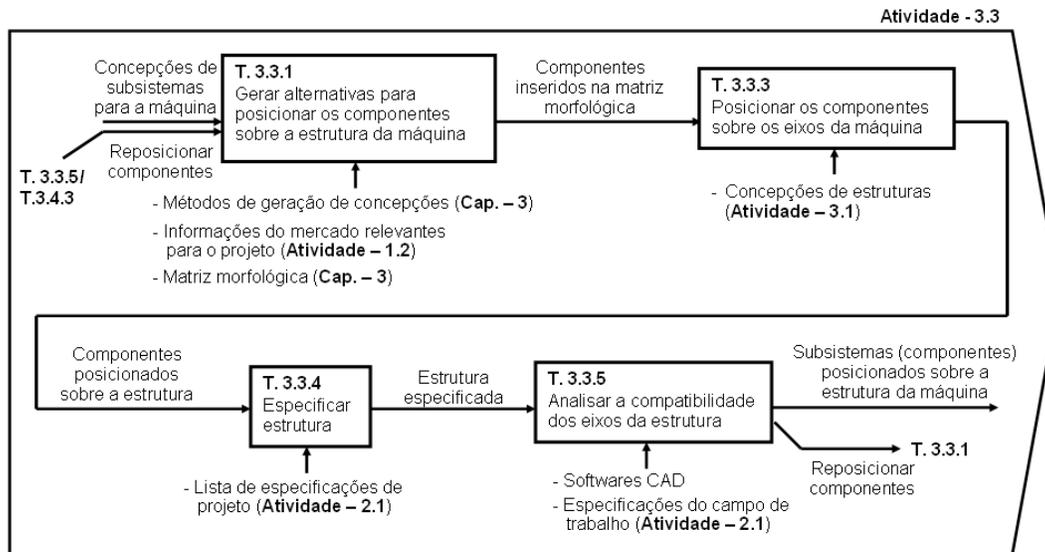


Figura 4.24 - Fluxo das tarefas da atividade 3.3.

Com relação a Figura 4.24 devem-se desenvolver alternativas para posicionar os componentes escolhidos na **atividade 3.2** sobre os eixos da estrutura da máquina. Este procedimento pode ser efetuado por meio de pesquisas no mercado (formas de posicionar os componentes) ou por meio da utilização de métodos de geração de concepções.

As possibilidades para posicionar os componentes sobre os eixos da estrutura da máquina devem ser inseridas em uma matriz morfológica (Figura 4.25). Devendo-se implementar uma matriz por cada eixo da máquina. Uma vez preenchidas as matrizes devem-se gerar combinações adotando um princípio de solução por cada linha, como resultado devem ser obtidos um conjunto de componentes montados sobre os eixos da estrutura da máquina definida na **atividade 3.1** (Figura 4.25).

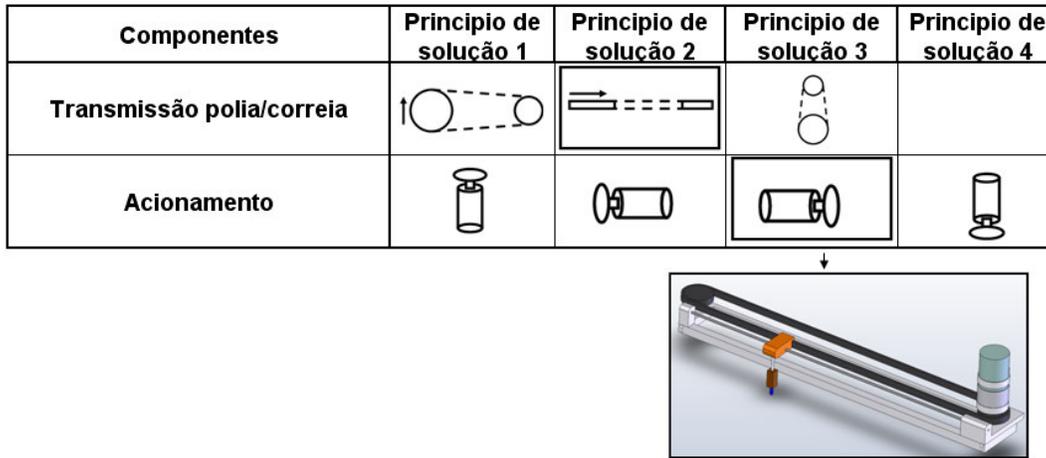


Figura 4.25 - Matriz morfológica para adotar os componentes a um eixo

Na escolha dos componentes para o eixo da máquina na Figura 4.25, deve-se sempre ir procurando a compatibilidade entre os componentes. Componentes como os mancais, acoplamentos e guias pelo geral devem se adaptar à posição do sistema de transmissão e acionamentos.

Já posicionados os componentes sobre os eixos da máquina devem-se especificar as dimensões da estrutura, definir o tipo de material dos eixos e definir os tipos de conexões, reforços e unidades que permitirão o acoplamento dos eixos da máquina e o posicionamento dos componentes.

Para finalizar a atividade devem ser unidos os eixos da máquina e representados em um *software* CAD, com o objetivo de montar virtualmente as concepções de máquinas, verificando a compatibilidade entre os eixos da máquina sem a interferência de movimento entre os eixos e os componentes da máquina e constatando que sejam atendidas as dimensões do campo de trabalho (**atividade 2.1**), etc. A Figura 4.26 apresenta um exemplo de uma máquina laser desenhada em um *software* CAD. No caso que não exista compatibilidade entre os eixos da máquina deve-se voltar à **tarefa 3.3.3** para procurar outras alternativas para posicionar os componentes.

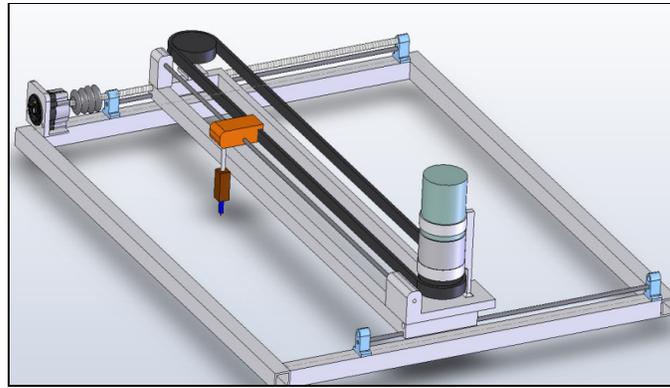


Figura 4.26 - Exemplo da análise de compatibilidade de uma máquina laser.

#### 4.4.4 - Atividade 3.4 - Dimensionamento dos acionamentos e escolha do comando/controlador

Nesta atividade é apresentado um procedimento que permitirá dimensionar e avaliar os acionamentos para cada um dos eixos da máquina e serão apresentadas algumas informações que deverão ser consideradas para a escolha do comando/controlador. A Figura 4.27 mostra o fluxo de tarefas da atividade 3.4.

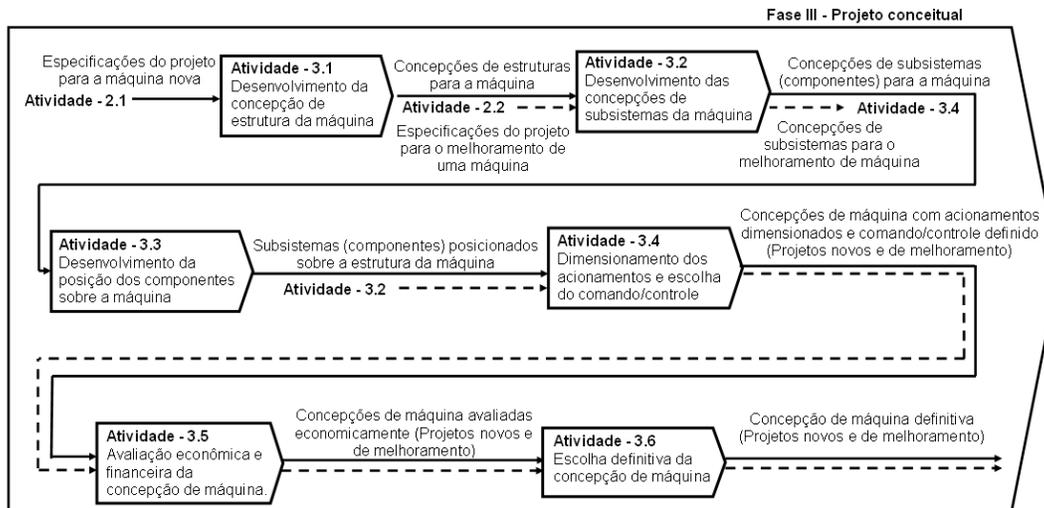


Figura 4.27 - Fluxos das tarefas da atividade 3.4.

Dimensionar um acionamento consiste em calcular o torque necessário para movimentar uma determinada carga durante um percurso estabelecido em um tempo determinado, vencendo massas, inércias, deformações elásticas, atritos e forças que se opõem ao movimento.

Normalmente quando se trata de máquinas que não requerem forças úteis (força usinagem, por exemplo), como impressoras, laser, plotter, etc. 90% do torque é utilizado para acelerar as inércias e massas no regime transitório e o 10% restante é utilizado para vencer atritos e deformações elásticas dos componentes. Quando existe uma força de usinagem, o acionamento pode utilizar maior torque vencendo a força de usinagem do que acelerando as massas e inércias. Isto dependerá do tipo de usinagem, material usinado, etc.

Com relação à Figura 4.27, devem-se recopilar as informações necessárias para efetuar os cálculos de dimensionamento, especificações do projeto, tempo de resposta, aceleração, velocidade de trabalho, etc. (**atividade 2.1/2.2**), atritos, massas, inércias, etc. dos componentes que compõem os subsistemas da máquina (**atividade 3.2**) e as massas translativas da estrutura (**atividade 3.3**).

Nesta atividade é apresentado um conjunto de equações que permitirão determinar o torque de cada um dos acionamentos de forma independente. Para orientar o projetista os valores contidos nestas equações são apresentados em um modelo de uma máquina de usinagem (Figura 4.28).

A Tabela 4.10 apresenta um conjunto de equações que permitem calcular o torque necessário para vencer o atrito em guias/mancais que interatuam com sistemas de transmissão por parafuso/castanha e pinhão/cremalheira. No caso em que existam forças de usinagem ou pré-cargas aplicadas nas guias/mancais do sistema, estas deverão ser consideradas na equação ( $F_{vt} / F_{pl}$ ).

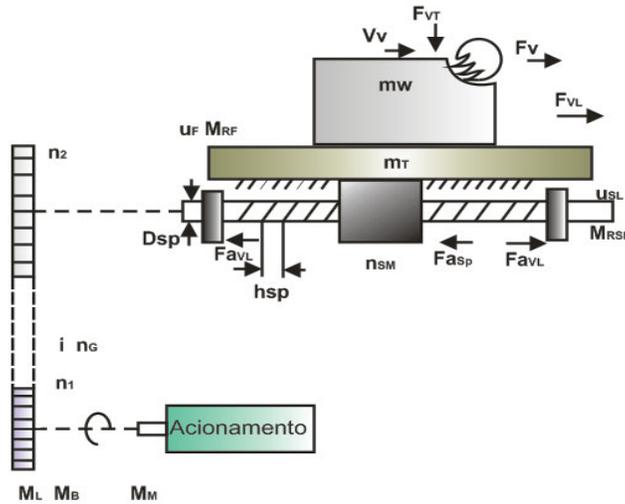


Figura 4.28 - Desenho do eixo de uma máquina de usinagem com um sistema de transmissão conversora e transformadora

Tabela 4.10 - Equações para calcular torque necessário para vencer o atrito no sistema (baseado em Gross,1983).

Equação para calcular o torque necessário para vencer o atrito no deslizamento das guias para sistemas de transmissão com <b>parafuso/castanha</b> .	$M_{RF} = \mu_F(v) \cdot \frac{h_{sp}}{2\pi} [(m_w + m_T) \cdot g + F_{vt} + F_{pl}]$
Equação para calcular o torque necessário para vencer o atrito no deslizamento das guias para sistemas de transmissão com <b>pinhão/cremalheira</b> .	$M_{RF} = \mu_F(v) \cdot r_R [(m_w + m_T) \cdot g + F_{vt} + F_{pl}]$
Equação para calcular o torque necessário para vencer o atrito dos mancais para sistemas de transmissão com <b>parafuso/castanha</b> .	$M_{RSL} = \mu_{SL}(v) \cdot \frac{1}{2} d_{mL} \cdot F_{aVL}$
Equação para calcular o coeficiente de atrito para sistemas de transmissão com <b>parafuso/castanha</b> . esta perda de atrito é medida mediante um coeficiente de eficiência, conforme os fabricantes de parafusos de esferas.	$\eta_{SM} \approx \frac{1}{1 + 0.02 \frac{d_{SP}}{h_{SP}}}$

As equações apresentadas na Tabela 4.10 permitem calcular o torque necessário para vencer os atritos mais categóricos no sistema, mas dentro do sistema seguem existindo outros atritos, por exemplo, entre os dentes da polia e da correia de um sistema de transmissão, entre os dentes de duas engrenagens, etc.

Os torques requeridos para vencer os atritos do sistema devem ser somados utilizando as equações apresentadas na Tabela 4.11. No caso em que exista uma força de usinagem no sistema, devera ser calculado um

segundo torque com as equações apresentadas na Tabela 4.12, na seqüência devem-se somar ambos os torques (atrito/usinagem).

Tabela 4.11 - Equações para somar os torques necessários para vencer o atrito no sistema (baseado em Gross, 1983).

Equação para obter a somatória dos torques necessários para movimentar a carga vencendo as forças atritos no regime estacionário, esta equação deve ser considerada para máquinas com sistemas de transmissão com <b>parafuso/castanha</b> .	$\sum M_R = \frac{M_{RP} + M_{RSI}}{\eta_{SM} \cdot i}$
Equação para obter a somatória dos torques necessários para movimentar a carga vencendo as forças de atritos no regime estacionário, esta equação deve ser considerada para máquinas com sistemas de transmissão com <b>pinhão/cremalheira</b> .	$\sum M_R = \frac{M_{RP}}{\eta_G \cdot i}$

Tabela 4.12 - Equações calcular o torque necessário para vencer a forças de usinagem e para a somatória de torques total (baseado em Gross, 1983).

Equação para obter o torque necessário para vencer as forças de usinagem em máquinas com sistemas de transmissão com <b>parafuso/castanha</b> .	$M_V = \frac{F_{VL} \cdot h_{sp}}{2\pi \cdot i \cdot \eta_G \cdot \eta_{SM}}$
Equação para obter o torque necessário para vencer as forças de usinagem para máquinas com sistemas de transmissão com <b>pinhão/cremalheira</b> .	$M_V = \frac{F_{VL} \cdot r_E}{i \cdot \eta_G}$
Equação para obter o torque necessário para vencer a força atrito no regime estacionário quando existe uma força de usinagem.	$M_L = M_V + M_R$

Na continuação deve-se calcular o torque necessário para acelerar as massas e as inércias do sistema (regime transitório). Este procedimento começa com o calculo e a somatória de todas as inércias e massa do sistema utilizando as equações apresentadas na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Equações para calcular e somar as inércias e massas do sistema.

Segundo Gross (1983) esta equação permite obter a inércia da carga sobre o parafuso de transmissão.	$J_{T+W} = (m_W + m_T) \left( \frac{h_{sp}}{2\pi} \right)^2$
Segundo Gross (1983) esta equação permite obter a inércia do parafuso para sistemas de transmissão com <b>parafuso/castanha</b> (inserir os dados em mm).	$J_{SP} = 0.77 \cdot 10^{-12} \cdot (d_{sp}) \cdot l_{sp}$
Segundo Gross (1983) esta equação permite realizar a somatória de todas as inércias do eixo da máquina.	$j = j_M + j_{GT1} + \frac{j_{GT2} + j_{T+W} + j_{SP}}{i^2}$
Segundo Ogata (1993), em caso de existir um redutor na saída do eixo do acionamento, pode se utilizar esta equação que permite obter a inércia depois do redutor.	$j_r = \left( \frac{1}{i} \right)^2 \cdot j$

Já conhecidas as especificações de projeto (tempo de resposta, aceleração, velocidade de trabalho), é possível calcular o torque necessário para acelerar as massas e as inércias (regime transitório) utilizando as equações apresentadas na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 - Equações para calcular o torque necessário para o regime transitório da máquina.

A seguinte equação permite obter o tempo de resposta que demorara o posicionador em atingir a sua velocidade de trabalho	$t_h = \frac{v}{a}$
Segundo Gross (1983) esta equação permite obter o torque para movimentar cargas dinâmicas no regime transitorio	$M_b = \frac{2\pi \cdot J \cdot RPM_{(\max \text{ i m m z})}}{60 \cdot t_h}$

#### 4.4.4.1 - Tarefa 3.4.3 - Avaliação dos acionamentos

Determinado o torque para cada um dos eixos de movimento da máquina, deve-se verificar se os acionamentos escolhidos para o projeto na **atividade 3.2** atendem os torques requeridos.

Na Figura 4.29 é apresentado um conjunto de soluções priorizadas para os acionamentos que não atendem o torque requerido tais como: alterar a transmissão mecânica existente (passo do fuso, diâmetros das polias, etc.); introduzir uma redução no sistema; introduzir uma redução e alterar os componentes da transmissão; modificar as características construtivas do acionamento e como última alternativa, experimentar outro tipo de acionamento. Ante a utilização de qualquer destas alternativas antes mencionadas, deve-se sempre verificar que as modificações sobre a máquina não afetem as especificações de projeto. No caso em que o acionamento atenda o torque exigido e existam modificações nos componentes ou na estrutura da máquina, deve-se voltar à **atividade 3.3** para reposicionar os componentes sobre os eixos da máquina.

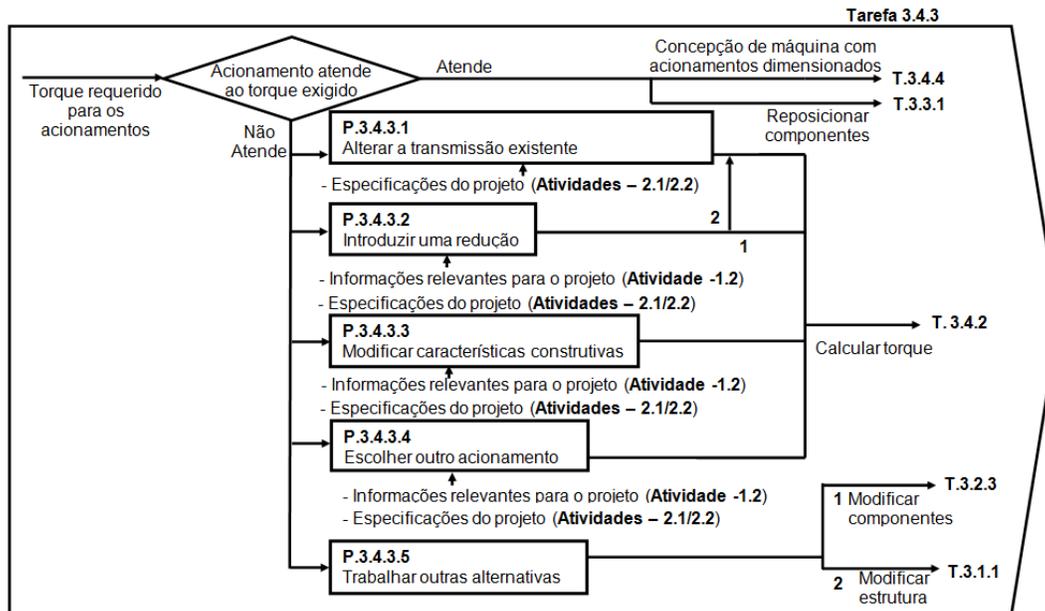


Figura 4.29 - Passos de avaliação dos acionamentos em relação do torque.

Se, dentre as alternativas apresentadas anteriormente nenhuma permite atender o torque exigido, ou atendem o torque mas as mudanças requeridas afetam de forma crítica as especificações de projeto, deve-se ir ao passo **P.3.4.3.5** da Figura 4.29, a qual apresenta alternativas priorizadas para resolver o problema. A primeira alternativa consiste em modificar os componentes da máquina (subsistema de transmissão) procurando outros componentes que apresentem uma maior dinâmica reduzindo o torque exigido para o acionamento. Uma segunda alternativa consiste em alterar a estrutura escolhida procurando reduzir a massa translativa desta ou procurando outro tipo de estrutura.

#### 4.4.4.2 - Tarefa 3.4.4 - Seleção e escolha do comando/controle

Na continuação, deve-se escolher o subsistema de comando/controle para a concepção de máquina. Para isto deve-se verificar se existe compatibilidade entre as características da máquina e as características do comando/controle, devem-se avaliar os comando/controles com relação às especificações do projeto e às vantagens que estes oferecem, e devem-se conhecer os passos que devem ser considerados para desenvolvimento das placas (Figura 4.30).

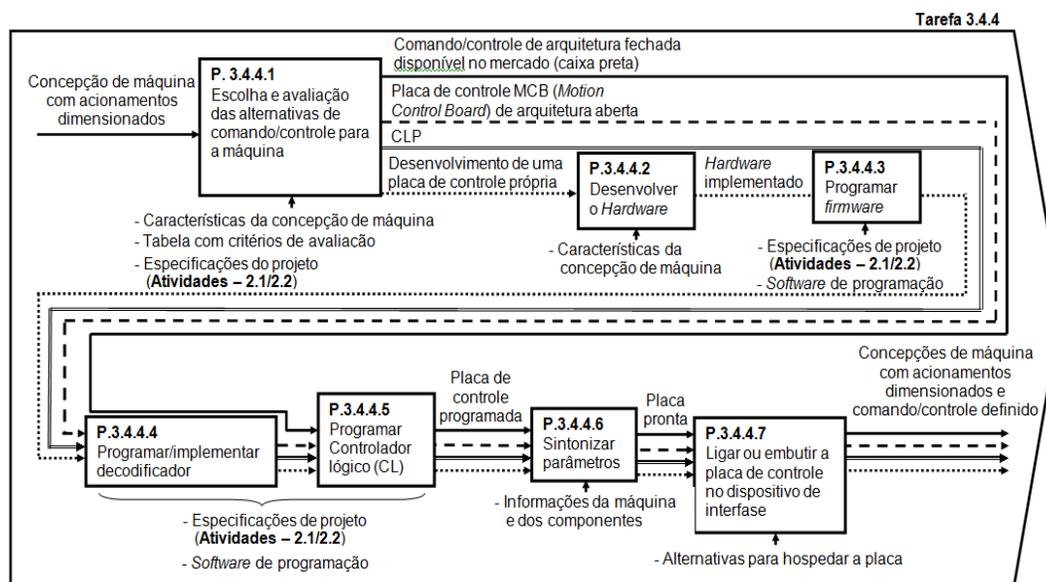


Figura 4.30 - Fluxo de passos que devem considerados na escolha do comando/controle.

Com relação à Figura 4.30, deve-se partir verificando se as características do comando/controle atendem às características da máquina: número de entradas/saídas necessária para os componentes da máquina (motores, sensores, bombas, etc.), tipos de sinais (analógico-digital), magnitudes dos sinais, etc. Além disso, neste passo (**P.3.4.4.1**) devem se comparar e avaliar as alternativas de comando/controles em relação a critérios tecnológicos, técnicos, econômicos, etc. (ver vantagens e desvantagens no capítulo 2). A Tabela 4.15 apresenta uma comparação das tecnologias de comando/controles mais utilizados para projetos de automação de máquinas.

Tabela 4.15 - Avaliação das alternativas do subsistema comando/controle disponível no mercado

Especificações	Desenvolvimento de uma placa de controle própria	Placa MCB (Motion control board) arquitetura aberta	CLP (Controle lógico programável)	Comando/controle de arquitetura fechada disponível no comercio (caixa preta)
Operabilidade continua	Sim (*)	Sim (*)	Sim	Sim
Possibilidade de alterar o Hardware	Sim	Não	Não	Não
Compatível com varios linguagens de dados	Sim	Sim	Não	Limitado pelo fabricante
Conhecimentos especificos	Alto	Médio	Baixo	Baixo
Facilidade de programação	Complexo	Médio	Fácil	Fácil
Tempo de implementação	Alto	Médio	Médio	Baixo
Custo	Alto	Médio	Médio	Alto

(\*) Sendo independente ao PC

Na Figura 4.30 são apresentados os passos que devem ser considerados no desenvolvimento dos comando/controles.

No passo **P.3.4.4.2** deve-se desenvolver todo o *hardware* (por exemplo, processador, memória de armazenamento de dados e programa, interfaces de entrada/saída, etc.); no passo **P.3.4.4.3** deve-se programar as funções de comando/controle (*firmware*) (interpolação, malha de controle, gerador de trajetórias, etc.); no passo **P.3.4.4.4** deve-se programar/implementar o decodificador de linguagem de programa-peça que pode ser um arquivo de saída de CAD/CAM; no passo **P.3.4.4.5** deve-se programar as funções do controlador lógico (CL) para processamento das informações tecnológicas (IT) e informações miscelâneas (IM) (bombas, portas, etc.); uma vez terminada a programação das funções do processador no passo **P.3.4.4.6** devem ser inseridas as informações de parametrização (números de eixos, valores de PDI, resolução de encoder, tipo de resolução, passo do fuso, etc.); por último no passo **P.3.4.4.7** a placa deve ser embutida ou ligada em um PC ou em um dispositivo desenvolvido especificamente para a máquina com uma tela e teclado próprio permitindo a interfase entre máquina e usuário.

A programação destas funções deve ser realizada por meio de *Softwares* (maiormente disponibilizados pelo fabricante da placa) e baseando-se nas especificações do projeto (número de eixos, coordenadas, entradas e saídas, tipo de controle, etc.). No capítulo 2 são descritos cada uma dos comando/controle de forma mais detalhada (processo de implementação, vantagens, desvantagens, etc.).

#### **4.4.5 - Atividade 3.5 - Avaliação econômica e financeira da concepção de máquina**

Nesta atividade é apresentado um procedimento que permite avaliar de forma simples os custos de aquisição da máquina. Enfoca-se principalmente nos custos da estrutura e dos componentes que compõem a máquina. Este procedimento permitirá determinar a viabilidade econômica das concepções de máquinas para o projeto. A Figura 4.31 mostra o fluxo de tarefas da atividade 3.5.

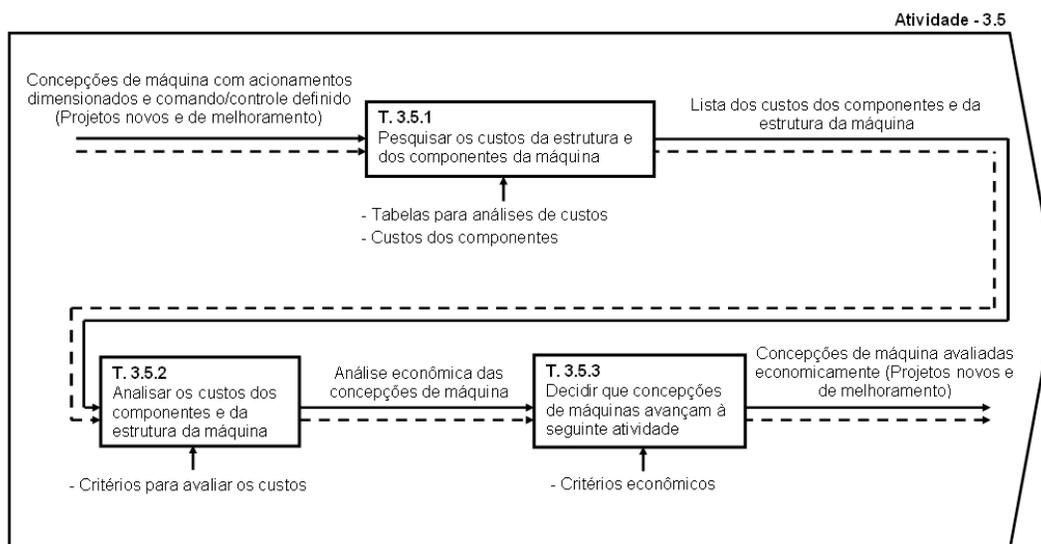


Figura 4.31 - Fluxos das tarefas da atividade 3.5.

Com relação à Figura 4.31 devem-se pesquisar os custos de aquisição da estrutura especificada na **atividade 3.3** e o custo de aquisição dos componentes que compõem os subsistemas da máquina obtidos na **atividade 3.2**. Estas informações devem ser inseridas na Tabela 4.16 e Tabela 4.17 respectivamente da forma como se apresentam. No caso de um projeto de melhoramento, a estrutura segue sendo a mesma pelo que esta não deve ser avaliada economicamente.

Tabela 4.16 - Exemplo de lista dos custos de aquisição da estrutura para a máquina.

Avaliação econômica da estrutura máquina				
Itens	Quant.	Componentes da estrutura	Custo R\$	Custos percentuais (%)
<b>1</b>		<b>Eixo X</b>	<b>3.850</b>	<b>45,83</b>
1.1	2	Perfis de alumínios 1,5 x 0,2 x 0,3 m	3.500	41,67
1.2	3	Conexões	300	3,57
1.3	1	Reforços	50	0,60
<b>2</b>		<b>Eixo Y</b>	<b>2.250</b>	<b>26,79</b>
2.1	1	Perfis de alumínios 2 x 0,3 x 0,3 m	2.000	23,81
2.2	2	Conexões	200	2,38
2.3	1	Reforços	50	0,60
<b>3</b>		<b>Eixo Z</b>	<b>2.300</b>	<b>27,38</b>
3.1	1	Perfis de alumínios 1 x 0,5 x 0,1 m	2.000	23,81
3.2	2	Conexões	200	2,38
3.3	2	Reforços	100	1,19
		<b>Total</b>	<b>8.400</b>	<b>100,00</b>

Tabela 4.17 - Exemplo de lista dos custos de aquisição dos componentes que compõem os subsistemas da máquina.

<b>Avaliação econômica dos componentes da máquina</b>			
<b>Itens</b>	<b>Componentes</b>	<b>Custo R\$</b>	<b>Custos percentuais</b>
<b>1</b>	<b>Comando/controle</b>	<b>9.000</b>	<b>40,05</b>
1.2	CNC	9.000	40,05
<b>2</b>	<b>EIXO X</b>	<b>3.750</b>	<b>16,69</b>
2.1	Sistema de transmissão polia correia	800	3,56
2.2	Acionamento eletromecânico (Driver/motor)	1.200	5,34
2.3	Guias de rolamentos cilíndrico	800	3,56
2.4	Mancais de rolamentos	950	4,23
<b>3</b>	<b>EIXO Y</b>	<b>4.900</b>	<b>21,81</b>
3.1	Sistema de transmissão polia correia	950	4,23
3.2	Redutor <i>Harmonic driver</i>	2.100	9,35
3.3	Acionamento eletromecânico (driver/motor)	1.200	5,34
3.4	Guias de rolamentos cilíndrico	650	2,89
<b>4</b>	<b>EIXO Z</b>	<b>4.820</b>	<b>21,45</b>
4.1	Acionamento eletromecânico (Driver/motor)	1.000	4,45
4.2	Sistema de transmissão parafuso castanha	2.200	9,79
4.3	Mancais de rolamentos	800	3,56
4.4	Acoplamento	320	1,42
4.5	Guias de rolamentos cilíndrico	500	2,23
	<b>Total Final</b>	<b>22.470</b>	<b>100,00</b>

A análise dos custos da máquina pode ser efetuada por meio de dois procedimentos. O primeiro consiste em realizar uma análise dos custos mais elevados para cada um dos componentes que compõem a máquina.

Na Tabela 4.17 pode-se observar que existem algumas porcentagens de custos elevados, esses itens devem ser submetidos a uma análise para verificar as possíveis causas dos elevados custos e determinar as decisões que permitiriam reduzi-los. Por exemplo, os sistemas de transmissão para os eixos Y e Z apresentam um valor percentual sobre o custo da máquina de 19, 14%, sendo um valor elevado para a máquina. Por isto é que deve se experimentar outras alternativas que permitam reduzir os custos sem perda da qualidade. Como alternativas podem ser: utilizadas outras transmissões, procurar outro fornecedor de transmissões, adquirir uma transmissão usada, desmontar uma transmissão de uma máquina em desmontagem, ver que sistemas de transmissões são utilizadas em máquinas similares, etc.

O segundo procedimento para analisar os custos dos componentes que compõem as concepções de máquinas, deve ser efetuado entre duas concepções de máquina e em três níveis (Tabela 4.18).

Tabela 4.18 - Comparativo de custos entre duas concepções de máquinas.

Análise dos custos de aquisição entre as concepções de máquina			
Nível um	Concepção de máquina um R\$ 10.000	Concepção de máquina dois R\$12.000	
Nível dois	Eixo X R\$2.500	Eixo X R\$4.000	
Concepção de máquina um R\$13.500	Eixo Y R\$4.000	Eixo Y R\$3.000	Concepção de máquina dois R\$12.800
	Eixo Z R\$2.500	Eixo Z R\$1.300	
	Estrutura R\$4.500	Estrutura R\$3.500	
Nível três	Eixo Y R\$4.000	Transmissão parafuso/castanha \$2.000	Transmissão Polia/correia R\$1.000
	Acoplamento de foles R\$500	Acoplamento de foles R\$500	Eixo Y R\$3.000
	N.....	N.....	

No nível um são avaliadas as diferença de custos de aquisição total de duas concepções de máquinas. Este primeiro nível consiste em comparar de forma direta os custos de aquisição das máquinas tendo uma visão mais abstrata da viabilidade da máquina.

No nível dois são avaliadas as diferenças de custos entre os eixos das concepções de máquinas com o mesmo tipo de estrutura. Esta análise permite intercambiar os eixos entre as concepções de máquina.

No nível três são avaliadas as diferenças de custos entre os componentes que compõem os eixos da máquina. Neste nível deve-se realizar uma análise individual dos componentes, permitindo tentar trocar componentes entre os eixos das concepções de máquina.

As análises apresentadas permitem avaliar a viabilidade econômica das concepções de máquina, permitindo decidir que concepções de máquinas devem passar à próxima atividade.

#### 4.4.6 - Atividade 3.6 - Escolha definitiva da concepção de máquina

Nesta atividade será apresentado um procedimento que oriente na definição da máquina definitiva para o projeto. Este procedimento consiste em avaliar todas as concepções de máquina em relação a critérios que permitam separar as concepções viáveis das inviáveis, visando identificar a melhor escolha dentre as alternativas desenvolvidas. Decisões errôneas nesta atividade da sistemática podem tornar-se irreversíveis e comprometer o projeto. A Figura 4.32 mostra o fluxo de tarefas da atividade 3.6.

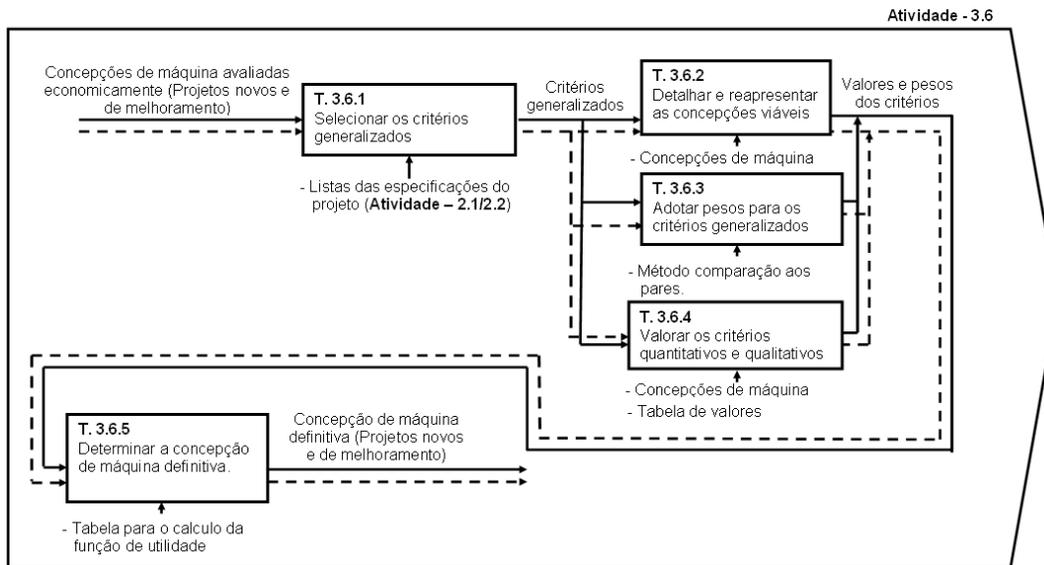


Figura 4.32 - Fluxo das tarefas da atividade 3.6.

Em relação à Figura 4.32, devem-se estabelecer critérios ou limites que permita distinguir as concepções úteis daquelas que devem ser abandonadas. Estes critérios devem ser claramente definidos, independentes, não ambíguos, redigidos positivamente e igualmente aplicáveis em todas as concepções de máquina.

Os critérios devem ser estabelecidos tendo por base as necessidades dos usuários internos e externos e, por conseqüência, as especificações de projeto. A Tabela 4.19 apresenta um exemplo de critérios típicos utilizados para automação de máquinas. Os critérios aqui utilizados serão usados como demonstração dos procedimentos que procedem.

Tabela 4.19 - Critérios generalizados para projetos de automação de máquinas.

Nº	Critérios generalizados adotados	Critérios específicos	Faixas dos critérios específicos
1	Dinâmicos	Massa do sistema	(-) Kg
		Inercia do sistema	(-) Kg m <sup>2</sup>
		Rigidez	(+)
		Histeres dos eixos ( Eixos X, Y e Z)	(-) um
		Precisão ( Eixos X, Y e Z)	(+) um
2	Custos	Custos de manutenção	(-) R\$
		Custos dos componentes	(-) R\$
		Custo da estrutura	(-) R\$
3	Estrutura	Quantidade de componentes	(-) Unidades
		Quantidade de peças da estrutura	(-) Unidades
		Fácil montagem	(-) Horas
4	Viável tecnicamente	Disponibilidade dos componentes	(+) Unidade
		Disponibilidade dos materiais	(+) Unidade
5	Manutenção	Fácil manutenção	(-) Horas
		Períodos de manutenção preventiva	(+) Horas
6	Alta confiabilidade	Probabilidade de sucesso	(%)
		Taxa de falhas	(-) Falhas ou (+) horas de operação
		Tempo médio entre falhas	(+) Horas

As concepções de máquinas devem ser submetidas a uma análise mais detalhada com o objetivo de diferenciar e ordenar as concepções alternativas. Estes detalhes devem basear-se em identificar os princípios de solução dos subsistemas e as possibilidades tecnológicas e riscos envolvidos no desenvolvimento, fabricação e uso do produto. As concepções de máquinas devem ser rerepresentadas e discutidas pela equipe de desenvolvimento, devem-se também identificar os critérios específicos destas.

Quando os critérios são definidos, dificilmente pode-se considerar que os mesmos tenham o mesmo peso ou sejam igualmente importantes, é por isso que devem-se determinar os pesos de importância dos critérios generalizados. Para este procedimento é utilizado o método de comparação aos pares, o qual consiste em inserir os critérios generalizados na primeira fila e na primeira coluna da Tabela 4.20, comparar cada critério a cada um dos outros, decidindo-se qual dos dois é o mais importante a cada comparação. Ao critério mais importante atribui-se o valor 1 e ao outro o valor 0. Quando os dois critérios são igualmente importantes, atribui-se o valor 0,5 a cada um.

Tabela 4.20 - Matriz de avaliação por comparação dos pesos dos critérios de seleção (adaptada de Back *et al.*, 2008).

		Critérios										Soma da linha	Pesos
		X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	Si	Wi
Critérios	(+) Precisão eixo X	---	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	0,200
	(-) Inercia	0	---	0,5	0,5	0,5	0	0	1	1	0,5	4	0,089
	(+) Rigidez	0	0,5	---	0	0	0	0	1	1	0,5	3	0,067
	(-) Massa	0	0,5	1	---	1	0,5	0,5	1	1	0,5	6	0,133
	(-) Viabilidade tecnicas dos componentes	0	0,5	1	0	---	0,5	0,5	1	1	0,5	5	0,111
	(-) Custos dos componentes	0	1	1	0,5	0,5	---	0,5	1	1	0,5	6	0,133
	(-) Custos da estrutura	0	1	1	0,5	0,5	0,5	---	1	1	0,5	6	0,133
	(-) Quantidade de componentes	0	0	0	0	0	0	0	---	0,5	0,5	1	0,022
	(-) Quantidade de peças da estrutura	0	0	0	0	0	0	0	0,5	---	0,5	1	0,022
	(-) Folga	0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	---	4	0,089
												45	

Na seqüência efetua-se a soma dos valores de cada linha, obtendo-se os pesos absolutos  $S_i$ . Por ultimo determinam-se os pesos relativos dos critérios pela Equação 4.1.

$$w_i = \frac{S_i}{\sum_{j=1}^n S_j}$$

Equação 4.1

Na continuação devem-se separar os critérios quantitativos dos qualitativos para ser valorados. Para valorar os critérios qualitativos de cada uma das concepções de máquinas, deve-se conferir em que grau as concepções de máquinas atendem os critérios estabelecidos (Tabela 4.19). Por exemplo, se a concepção de máquina A apresenta um grau de segurança satisfatório e a concepção de máquina B apresenta um grau de segurança excelente, o critério generalizado segurança para a concepção de máquina I deve adotar um valor 1 e o critério segurança da concepção de máquina II deve adotar um 5, baseando-se na Figura 4.33. Com este procedimento devem ser avaliados todos os critérios qualitativos do projeto.

Figura 4.33 - Valorização dos critérios qualitativos

Valorização qualitativa dos critérios generalizados	Valorização numérica dos critérios (U <sub>i,j</sub> )
Satisfatório	1
Regular	2
Bom	3
Muito bom	4
Excelente	5

Os critérios quantitativos são, em geral, mensuráveis por parâmetros contínuos. Para que os critérios possam ser aplicados, em conjunto com critérios qualitativos na função de utilidade estes devem ser colocados na mesma escala.

Os critérios quantitativos para cada concepção de máquina devem ser avaliados de acordo com o grau de atendimento dos critérios estabelecidos na Tabela 4.19. Por exemplo, na Tabela 4.21 são apresentadas quatro concepções de máquinas que possuem quatro massas diferentes; como o critério generalizado estabelece que se requeira uma menor massa quanto possível, a concepção de máquina IV adota o maior valor para este critério por possuir a menor massa, ao contrário da concepção de máquina III que apresenta a massa maior adotando a menor pontuação. Os valores devem ser adotados de forma proporcional para cada critério generalizado. Com este procedimento devem ser avaliados todos os critérios quantitativos do projeto.

Tabela 4.21 - Valorização dos critérios quantitativos.

Concepções	Massa	Valor (U <sub>i,j</sub> )
Máquina I	70 kg	3
Máquina II	85 kg	2
Máquina III	100 kg	1
Máquina IV	40 kg	5

Uma vez valorados todos os critérios quantitativos e qualitativos, devem se inserir os critérios generalizados na Tabela 4.22 com seus respectivos valores ( $U_{i,j}$ ) e pesos ( $w_i$ ). Estes dados permitirão calcular os valores das funções de utilidade para cada uma das concepções de máquinas. A pontuação final orientará a escolha da concepção de máquina definitiva para o

projeto. Como se pode ver na Tabela 4.22 os cálculos permitem determinar que a concepção de máquina II é a mais adequada para o projeto.

Tabela 4.22 - Determinação do valor de utilidade das concepções de máquina.

Critérios generalizados	Pesos dos critérios Wi	Concepções de máquinas							
		Concepção de máquina I		Concepção de máquina II		Concepção de máquina III		Concepção de máquina IV	
		Ui, 1	Wi*Ui,1	Ui, 2	Wi*Ui,2	Ui, 3	Wi*Ui,3	Ui, 4	Wi*Ui,4
(+) Precisão eixo X	0,200	2	0,4	5	1	1	0,2	2	0,4
(-) Inercia	0,089	3	0,267	2	0,178	1	0,089	3	0,267
(+) Rigidez	0,067	3	0,201	1	0,067	2	0,134	2	0,134
(-) Massa	0,133	3	0,399	4	0,532	2	0,266	2	0,266
(-) Viabilidade tec. dos componentes	0,111	2	0,222	5	0,555	3	0,333	1	0,111
(-) Custos dos componentes	0,133	5	0,665	5	0,665	4	0,532	3	0,399
(-) Custos da estrutura	0,133	4	0,532	3	0,399	2	0,266	1	0,133
(-) Quantidade de componentes	0,022	3	0,066	5	0,11	5	0,11	5	0,11
(-) Quantidade de peças da estrutura	0,022	2	0,044	2	0,044	5	0,11	1	0,022
(-) Folga	0,089	1	0,089	1	0,089	3	0,267	3	0,267
Valor da função utilidade		2,885		3,639		2,307		2,109	
Ordenação das concepções		2ª Posição		1ª Posição		3ª posição		4ª Posição	

### 4.5 Fase IV - Projeto preliminar

A fase de projeto preliminar é constituída de duas atividades, cujo objetivo é modelar e simular a concepção de máquina definitiva para projetos de máquinas novas como para projetos de melhoramento de máquinas existentes. O detalhamento da fase é mostrado na Figura 4.34.

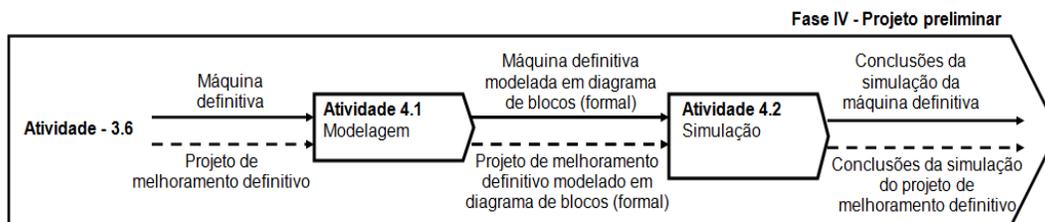


Figura 4.34 - Entrada e saída das informações principais da fase IV- projeto preliminar.

#### 4.5.1 - Atividade 4.1 - Modelagem

Nesta atividade é apresentado um procedimento que orientará a modelagem da concepção de máquina definitiva ou em seu caso do projeto de melhoramento. A modelagem proposta é baseada na metodologia de elementos de circuitos generalizados apresentada nas referências de Martin

(1993) valido só para sistemas cartesianos. A Figura 4.35 mostra o fluxo de tarefas da atividade 4.1.

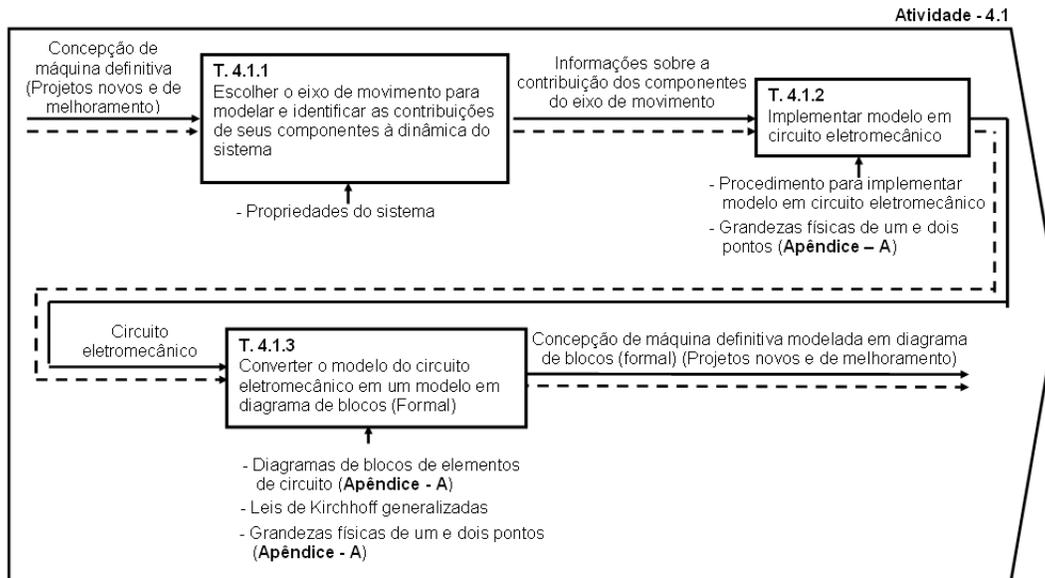


Figura 4.35 - Fluxo de tarefas da atividade 4.1.

Com relação a Figura 4.35 deve-se escolher o eixo de movimento da máquina a ser modelado e identificar as contribuições de seus componentes no sistema (armazenamento, dissipação e conversão) baseando-se nas propriedades de um sistema de massas, elasticidades e atritos. Por exemplo, as guias em um sistema contribuem como dissipadores e por serem móveis contribuem como armazenadores energia cinética. A correia de uma transmissão contribui como armazenadora de energia potencial devido a seu efeito de elasticidade e como dissipador nos atritos entre dentes da correia e polia.

Deve-se implementar circuito eletromecânico que seja capaz de representar o comportamento dinâmico do eixo de movimento da máquina. Para poder implementar o circuito eletromecânico deve-se realizar o seguinte procedimento:

1. - Dividir o sistema físico em partes, a quantidade destas dependerá, por exemplo, da quantidade de conversões de energia que existam no sistema físico (Figura 4.24). Uma conversão de energia existe, por exemplo, quando se

converte de uma grandeza elétrica a uma grandeza mecânica (caso do acionamento eletromecânico) ou quando se converte de um movimento mecânico rotativo a um translativo (sistema de transmissão conversora), entre outras.

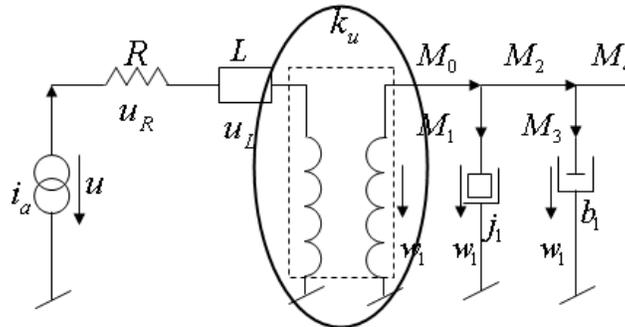


Figura 4.36 - Exemplo de circuito mecânico com duas partes separadas por conversor.

2. – Escolher o tipo de fonte de energia do circuito eletromecânico segundo o tipo de grandeza física que utilize para definir o comportamento do sistema. Esta fonte pode ser definida por uma grandeza de um ou de dois pontos (ver Apêndice A - “Grandezas de um e dois pontos”). Por exemplo, para modelar a fonte de energia de um movimento de translação pode-se utilizar uma velocidade (grandeza de dois pontos) ou de força (grandeza de dois pontos). A Figura 4.37 apresenta uma fonte de corrente elétrica (grandeza de um ponto) para o acionamento eletromecânico de um eixo de movimento.

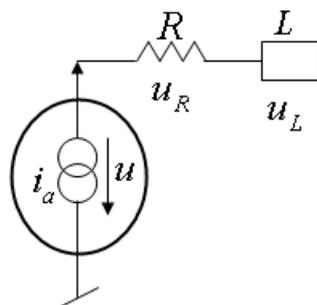


Figura 4.37 - Fonte de corrente elétrica, grandeza de um ponto.

3. – Inserir as propriedades do sistema (massas, elasticidades e atritos) em circuito eletromecânico correspondente ao sistema físico. Todas as massas no

modelo devem ser ligadas à referência potencial do sistema (terra), ou seja, ter a sua velocidade referida diretamente à velocidade do referencial inercial (velocidade=0). Todos os atritos e elasticidades ligadas a componentes fixos (que tem um ponto sem movimento) devem ser ligados ao referencial terra, no caso que se encontrem ligadas a dois pontos móveis do sistema devem ser colocadas em série com as velocidades dos elementos conectados (Figura 4.38).

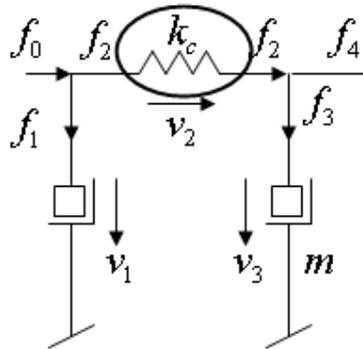


Figura 4.38 - Elasticidade conectada em serie devido a sua dependência a duas velocidades distintas.

4. - Especificar as variáveis físicas de um e dois pontos sobre cada uma das funções do sistema modeladas, detalhando se são mecânicas, elétricas, etc. (Figura 4.39).

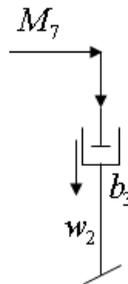


Figura 4.39 - Atrito rotativo ( $b_3$ ) sob um torque ( $M_7$ ) e sob uma velocidade angular ( $w_2$ ).

Uma vez terminada a elaboração do circuito eletromecânico, este pode ser convertido em um modelo de diagrama de blocos (formal) e para isto é necessário que não haja efeitos de retroação. Os nós e as malhas do circuito eletromecânico são representados por somadores. Um nó existe quando em

um ponto do circuito estão reunidas três ou mais grandezas de um ponto e uma malha existe quando em um trecho do circuito estão seqüenciados três ou mais grandezas de dois pontos (leis de Kirchhoff). A Figura 4.40 representa o exemplo de uma malha a qual é constituída por três velocidades distintas (grandezas de dois pontos).

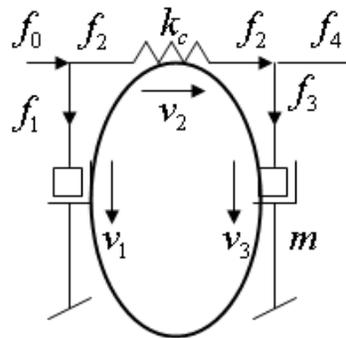


Figura 4.40 - Malha constituída de três velocidades distintas ( $v_1$ ,  $v_2$  e  $v_3$ )

As propriedades do sistema devem ser reformuladas para impedâncias ou admitâncias dependendo da grandeza de entrada e saída. A substituição das propriedades deve ser baseada nas tabelas apresentadas (ver Apêndice A - “Elementos de diagramas de blocos para elementos de circuito”). Estas tabelas detalham quando uma massa, elasticidade ou atrito deve ser substituído por uma admitância ou impedância. A Figura 4.41 representa o exemplo da transformação de um circuito mecânico para um modelo de diagrama de blocos (formal) onde do somador sai uma força ( $f_1$ ) que entra em uma impedância; desta impedância sai uma velocidade ( $v_1$ ), a qual entra em uma admitância onde sai uma força ( $f_2$ ) que retorna ao somador com polaridade negativa onde a somatória da saída com as entradas deve ser igual a zero.

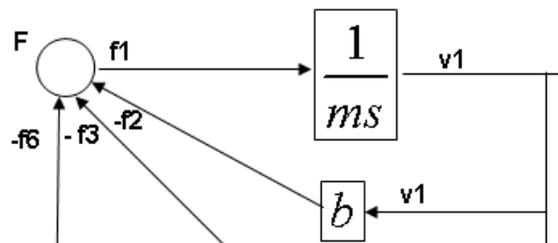


Figura 4.41 - Exemplo de modelo de diagrama de blocos (formal)

### 4.5.2 - Atividade 4.2 - Simulação

Nesta atividade é apresentado um procedimento que orientará a simulação da concepção de máquina definitiva ou em seu caso do projeto de melhoramento. O *software* de simulação Simulink, pertencente ao pacote de produtos Matlab versão 7.1 complementarará o procedimento proposto. Neste procedimento são considerados somente sistemas lineares. A Figura 4.42 mostra o fluxo de tarefas da atividade 4.2.

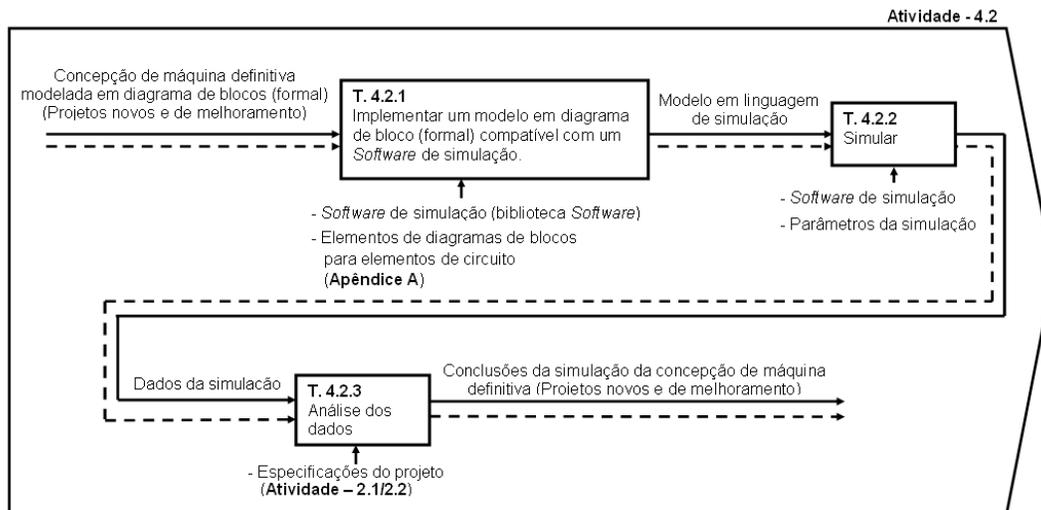


Figura 4.42 - Fluxo de tarefas da atividade 4.2.

Com relação a Figura 4.42 o modelo em diagrama de blocos (formal) deve ser modificado para tornar-se compatível com o software de simulação (Simulink). Devem ser substituídas as impedâncias e admitâncias por integrais, derivadas e ganhos, contidas na biblioteca do Simulink. Todo modelo de bloco do diagrama (formal) que apresente um S no numerador deve ser substituído por uma derivada; se apresenta um S no denominador deve ser substituído por uma integral e se é livre de S deve ser substituído por um ganho (ver apêndice A - “Elementos de diagramas de blocos para elementos de circuito”). Na seqüência, os valores numéricos das massas, elasticidades e atritos devem ser inseridos nos blocos (Figura 4.43) mantendo a homogeneidade dimensional.

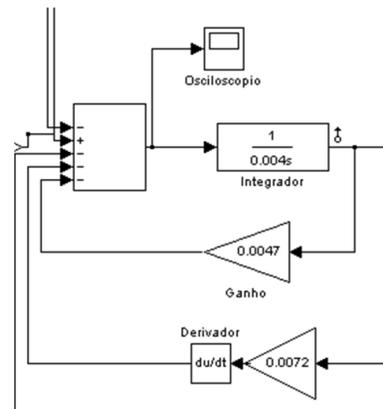


Figura 4.43 - Diagrama de blocos em linguagem para simulação com Simulink.

Por ultimo devem ser inseridos os parâmetros da simulação (tempo de simulação), simulado o eixo da máquina e analisados os dados obtidos em relação às especificações de projeto.

#### 4.6 - Considerações finais da sistemática

Uma vez finalizada a sistemática, o projetista deve ter obtido uma ou várias concepções de máquinas modeladas, simuladas e representadas em um modelo CAD, com as descrições técnicas, dinâmicas, funcionais, dimensionais, etc. e os custos dos componentes e partes que a compõem.

Dentre as atividades que não são feitas na sistemática por não ser parte dos objetivos se encontra a construção, avaliação, otimização e aprovação do protótipo; finalização de algumas das especificações dos componentes; tolerâncias, propriedades superficiais e materiais do produto, programação do comando/controle, instruções para o resto do ciclo de vida da máquina, programa de manutenção, preparação da produção, entre outras.

## Capítulo 5 - Estudo de caso

### 5.1 - Introdução

Neste capítulo é apresentado um estudo de caso, o qual mostrará a aplicação algumas tarefas das atividades da sistemática proposta. O estudo consiste no desenvolvimento de uma máquina para corte laser em chapas de aço. Os procedimentos da sistemática, especificações do projeto, escolha dos componentes, dimensionamento dos acionamentos, modelagem e simulação, etc. serão somente aplicados a um eixo de posicionamento da máquina como forma representativa.

#### Atividade - 1.1 - Definir o tipo de projeto

Este tipo de projeto foi definido como “um projeto para uma máquina nova” por tratar-se do desenvolvimento de uma máquina nova (começando desde zero), mas que sua função global é existente (laser). O que implica que a máquina deve-se desenvolvida desde as fases iniciais do desenvolvimento do produto (planejamento do produto).

#### Atividade - 1.2 - Desenvolvimento das idéias de máquina

Deseja-se implementar uma máquina para corte laser, que como função global seja capaz de realizar cortes em chapas de aço temperado de 2x2 m com espessuras de 0,0254 mm até 6,35 mm.

Analisando a função global da máquina desejada, pode-se definir como **primeira idéia** uma máquina que possua dois eixos X/Y para posicionar o cabeçote laser no ponto de corte, um eixo Z que permita posicionar o cabeçote laser na distância focal (distancia de corte) e por ultimo a chapa de aço fixada na mesa para corte. Uma **segunda idéia** seria uma máquina que possua dois eixos X/Y para movimentar a mesa com a chapa de aço em um plano X e Y e um eixo Z que permita posicionar o cabeçote laser na distância focal (Figura 5.1). Uma **terceira idéia** seria uma máquina que posicione o cabeçote laser no ponto de corte com os eixos X/Y e que a distância focal seja posicionada por um eixo Z o qual que eleva a mesa com a chapa de aço (Figura 5.1).

Como resultado da análise das idéias de máquinas, se determinou que a segunda idéia de máquina requiere de um maior espaço físico que as outras idéias de máquina para executar o seu trabalho, já que esta requer movimentar a mesa com a chapa de aço para efetuar o corte (Figura 5.1). Por outro lado a terceira idéia vai requerer acionamentos de maior torque para elevar a mesa com a chapa de aço (dinâmica ruim), sendo mais factível executar esta tarefa movimentando o cabeçote laser, como foi apresentado na primeira idéia de máquina, já que esta apresenta uma massa translativa menor. Com relação a esta análise determinou-se desenvolver a primeira idéia de máquina por apresentar as condições dinâmicas e estruturais mais propicias para o projeto do laser. Na Figura 5.1 são apresentadas as esquematizações das idéias de máquinas descartadas.

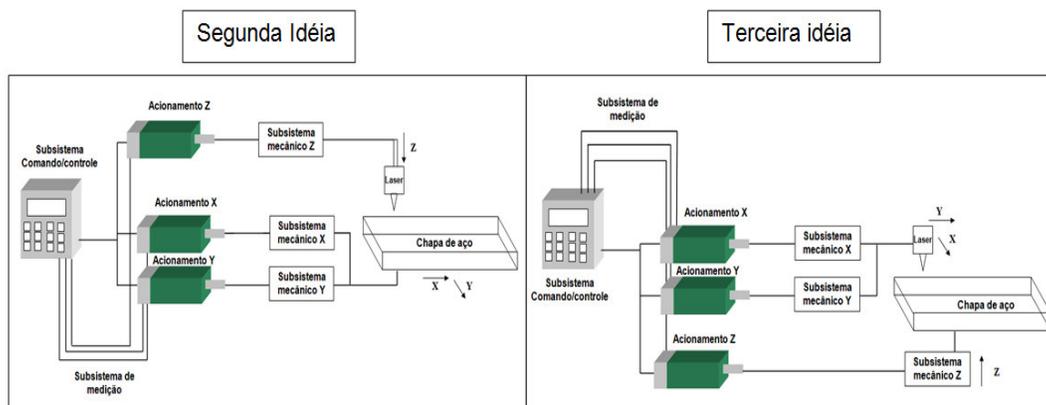


Figura 5.1 - Idéias de máquinas laser descartadas.

Em concordância com as informações antes expostas e baseando-se nos subsistemas que compõem uma máquina automatizada, foram realizadas as representações da idéia de máquina promissora (Figura 5.2 e Figura 5.3).

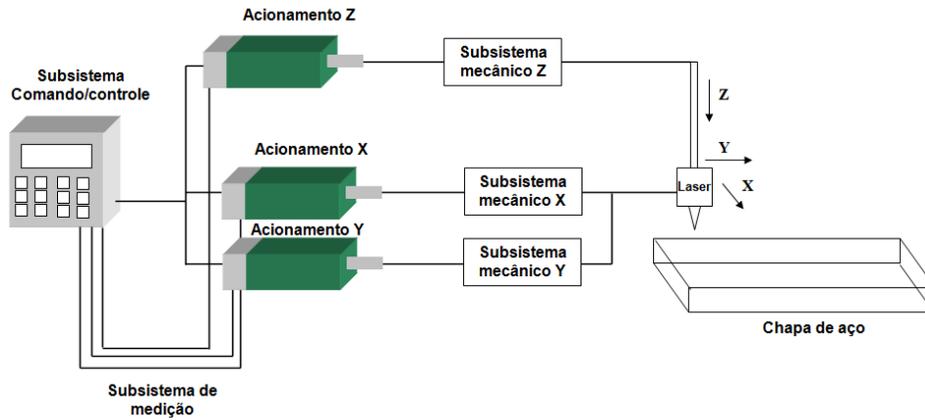


Figura 5.2 - Esquemática da idéia de máquina laser.

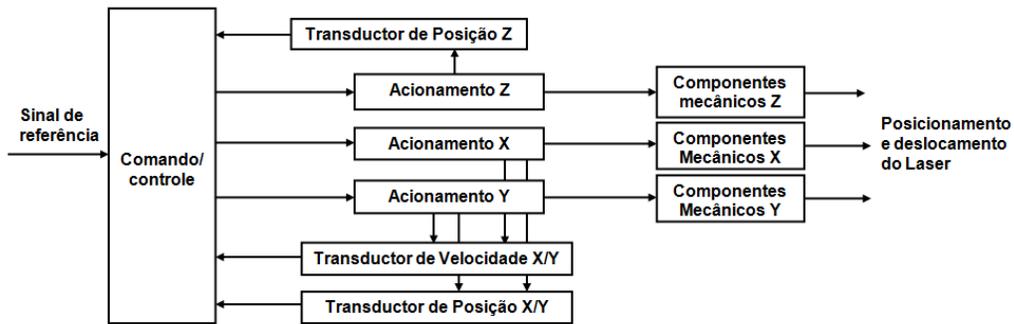


Figura 5.3 - Idéia de máquina laser representada em um diagrama de blocos.

### Atividade - 2.1 - Obtenção das especificações de projeto para uma máquina nova.

Esta atividade foi dividida em duas etapas, na primeira foram determinadas as especificações indispensáveis para o projeto (velocidade de trabalho, resolução, dimensões do campo de trabalho e tempo de resposta), e na segunda parte foram listadas as restantes especificações do projeto, baseando-se em algumas das especificações mais comuns para projetos de automação de máquinas.

Segundo a empresa SYNRAD (SYNRAD, 2008) fabricante de laser, a **velocidade de corte** para chapas de aço com espessura de 0,0254 mm deve ser de 0,208 m/s com uma potência de 400 Watts, entretanto a **velocidade de corte** para chapas de aço com espessura de 6,35 mm deve ser de 0,0047m/s com uma potência de 400 watts.

Para a especificação da **resolução do posicionamento** do eixo X do laser, definiu-se um valor aleatório de meia precisão (0,01 mm) como exemplo para o estudo de caso.

As **dimensões do campo de trabalho** são as seguintes: para a altura da máquina foram consideradas as distâncias apresentadas na Figura 5.4; em vermelho é representada a distância para a queda dos resíduos de aço durante o processo de corte (150 mm); em azul é representada a distância para montar a chapa de aço (corresponde à espessura máxima de uma chapa de aço que o laser pode cortar 6,35 mm); em verde é representada a distância focal mínima que deve manter o laser sobre uma chapa de aço com a espessura máxima (63,5mm). As informações acima especificadas indicam que a distância mínima entre o cabeçote laser da máquina e o solo deve ser de 219,85 mm. As dimensões da área do campo de trabalho em um plano X/Y são de 2x2 m (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.).

- Resíduos e sistemas exaustor
- Colocar chapas de aço
- Distancia focal

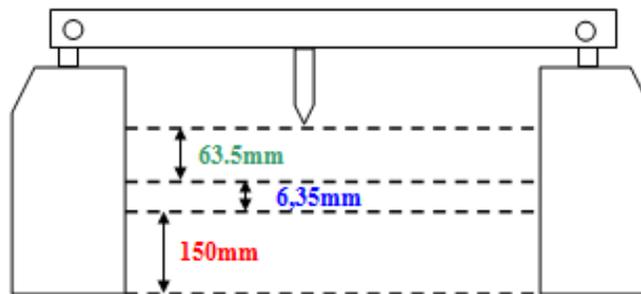


Figura 5.4 - Altura mínima para posicionar o cabeçote laser.

O **tempo de resposta** foi obtido por meio dos valores da velocidade máxima de corte 0,208 m/s e a distância máxima para atingir esta velocidade 0,1 m (Figura 5.5). Estes valores permitiram obter o valor da aceleração do acionamento  $0,216 \text{ m/s}^2$  e o tempo de resposta 0,96 s do eixo X do laser, para a obtenção destes resultados foram utilizadas as Equações 5.1 e 5.2.

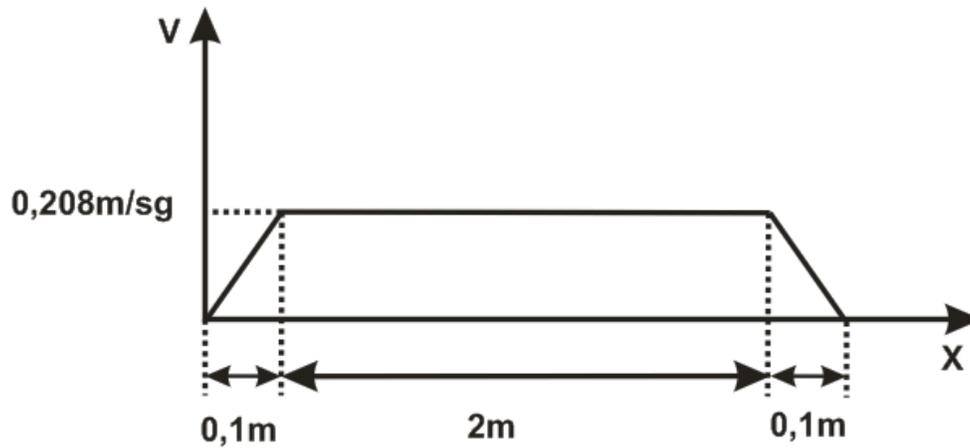


Figura 5.5 - Percurso segundo o eixo X para o posicionador atingir a velocidade de trabalho na qual se realiza o corte.

$$a_x = \frac{0,208^2}{2 \cdot 0,1} = 0,216 \text{ m/s}^2. \quad \text{Equação 5.1}$$

$$t_h = \frac{0,208}{0,216} = 0,96 \text{ s} \quad \text{Equação 5.2}$$

As especificações indispensáveis (velocidade de corte, resolução e tempo de resposta) obtidas nesta atividade foram inseridas na Tabela 5.1 em conjunto com outras especificações dinâmicas para o projeto. As demais tabelas de especificações (básicas, do ciclo de vida e estruturais), foram preenchidas com algumas das especificações mais comuns para projetos de automação de máquinas (Tabela 5.2 e Tabela 5.3).

Tabela 5.1 - Especificações dinâmicas para o projeto da máquina laser.

UFSC		Lista de especificações dinâmicas	Idéia de máquina I
Data	O/D	Especificações	Meta
		<b>1.- Especificações para o eixo X</b>	
9/03/2009	O	Velocidade de trabalho	> 0,208 m/s
9/03/2009	O	Aceleração	>0,216 m/sg <sup>2</sup>
9/03/2009	O	Resolução	>0,01mm
9/03/2009	D	(-) Massa	Menor possível (kg)
9/03/2009	D	(-) Inercia	Menor possível (kgm <sup>2</sup> )
9/03/2009	D	(-) Folga	Menor possível (mm)
9/03/2009	D	(+) Rigidez	Maior possível (nm)
9/03/2009	D	(-) Atrito	Menor possível
9/03/2009	D	(-) massa translativa	Menor possível (kg)
9/03/2009		<b>2.- Especificações dinâmicas gerais:</b>	
9/03/2009	O	Velocidade ajustável para realizar cortes de distintas espessuras	
9/03/2009	O	Controle de trajetória dos eixos para posicionar o LASER	
9/03/2009	O	Manter a velocidade de corte constante.	

Tabela 5.2 - Especificações básicas e do ciclo de vida para o projeto do laser.

UFSC		Lista de especificações básicas e do ciclo de vida	Idéia de máquina I
Data	O/D	especificações	Meta
		<b>1.- Básicas</b>	
15-03-2009	D	Segurança	Maior possível
15-03-2009	D	Robustez	Maior possível
16-03-2009	D	Adequada estética	Qualitativa
15-03-2009	D	Impacto ambiental	Menor possível
		<b>2.- Ciclo de vida</b>	
16-03-2009	D	(-) Mínima manutenção	Menor possível (tempo)
16-03-2009	D	(-) Baixa complexidade de fabricação	Menor possível (tempo)
16-03-2009	D	(-) Baixa complexidade funcional (baixa dinâmica)	Menor possível (tempo)
16-03-2009	D	(-) Tempo de montagem da estrutura	Menor possível (tempo)
16-03-2009	D	(-) Viabilidade técnica dos componentes	Maior possível (unidade)
16-03-2009	D	(-) Custos dos componentes	Menor possível (Reais)
16-03-2009	D	Ambiente de trabalho	(não industrial)
16-03-2009	D	(-) Custos da estrutura	Menor possível (Reais)
16-03-2009	D	(+) Confiável	Maior possível (tempo)
16-03-2009	D	(+) Compatibilidade com software comerciais (CNC)	Maior possível (Unidade)
16-03-2009	D	Aprendizagem fácil	Qualitativa
16-03-2009	D	Baixo riscos de acidentes	Qualitativa
16-03-2009	D	Fácil manipulação	Qualitativa

Tabela 5.3 - Especificações estruturais e do campo de trabalho para o projeto do laser.

UFSC		Lista de especificações para a estrutura e campo de trabalho	Ideia de máquina I
Data	O/D	Especificações	Meta
		<b>1.- Campo de trabalho</b>	
9/03/2009	O	Comprimento X	2,1 m
9/03/2009	O	Largura Y	2,1 m
		<b>Altura campo de trabalho</b>	
9/03/2009	O	Distância para colocar a chapa de aço	0,00635m
9/03/2009	O	Distância focal	0,0635m
9/03/2009	O	Distância para os resíduos de aço	0,15m
		<b>Altura total</b>	<b>0,21985m</b>
		<b>2.- Outras</b>	
9/03/2009	D	(-) Quantidade de componentes	<b>Menor possível (unidade)</b>
9/03/2009	D	(-) Quantidade de peças da estrutura	<b>Menor possível (unidade)</b>
9/03/2009	O	Dimensoes máximas de espaço	2,6m x 2,6m x 2,6m
16-03-2009	D	(-) Custos da estrutura	<b>Menor possível (Reais)</b>
		<b>3.- Estrutura</b>	
9/03/2009	D	Material	
9/03/2009	D	Dimensoes	

### Atividade - 3.1 - Desenvolvimento da concepção de estrutura da máquina

A partir desta atividade começaram-se a desenvolver as concepções de máquina para o projeto, começando pela criação, avaliação e escolha das concepções de estrutura para o projeto. Na Figura 5.6 são apresentadas várias concepções de estruturas para a máquina, as quais foram obtidas por meio da utilização do método de geração de concepções (*Brainstorming*), pela busca de estruturas de máquinas iguais ou similares no mercado e baseando-se nas representações esquemáticas da idéia de máquina.

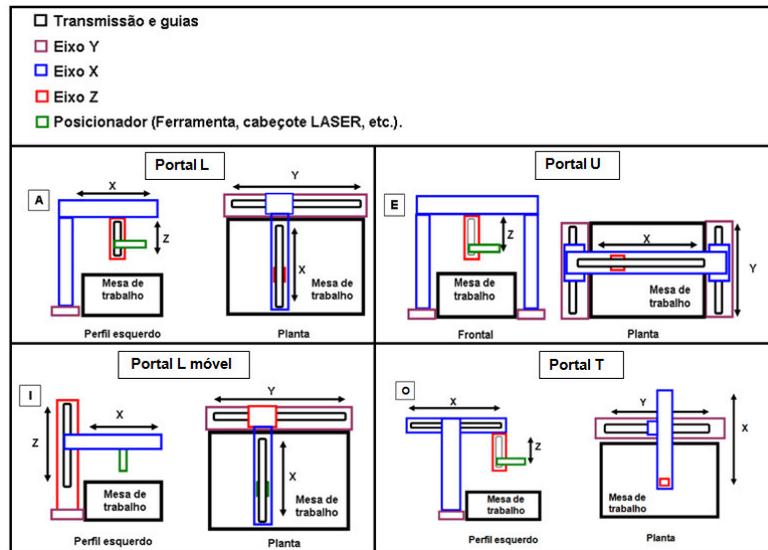


Figura 5.6 - Concepções de estruturas para uma máquina laser.

As concepções de estruturas para a máquina foram avaliadas na Tabela 5.4, determinando-se que a concepção de estrutura **O** apresenta condições impróprias para o projeto, não atendendo as especificações dimensionais máximas do projeto. Dentre as outras concepções de estruturas, as concepções de estrutura **A** e **I** poderiam apresentar uma baixa estabilidade e imprecisão operacional por tratar-se de estruturas com forma L e T respectivamente, Entretanto a estrutura tipo **E** deveria apresentar uma maior estabilidade e precisão devido a sua forma em U, é por isto que a concepção de estrutura tipo **E** foi utilizada para as atividades seguintes no estudo de caso.

Tabela 5.4 - Avaliação das concepções de estrutura para a máquina laser.

O = Atende		X = Não atende		
Avaliação das concepções de estrutura				
Especificações	Concepção A	Concepção E	Concepção I	Concepção O
Atende às dimensões máximas (2,6m x 2,6m x2,6m) de espaço	O	O	O	X
Atende a uma baixa complexidade de fabricação	O	O	O	O

### Atividade - 3.2 - Desenvolvimento das concepções de subsistemas da máquina

Utilizando as informações relacionadas com a função global da máquina, as representações esquematizadas e em diagrama de blocos da idéia de

máquina (**atividade 1.2**) e a concepção de estrutura tipo **E** escolhida na **atividade 3.1** foi possível estabelecer a síntese funcional do eixo X da máquina laser (Figura 5.7).

Com base na Figura 5.7 o eixo X necessita ser comandado e controlado por meio da imposição e aquisição de sinais (comandar/controlar). Dispor de um acionamento o qual deve converter a energia elétrica em energia mecânica (acionar). A energia mecânica deve ser transmitida ao sistema de transmissão por meio de um acoplamento dependendo do tipo de transmissão que seja utilizado (acoplar), a sua vez a transmissão deve movimentar o eixo de movimento (transmitir) por de percursos pré-estabelecidos por guias e mancais (guiar rotacional e linear). A posição e velocidade do eixo de movimento deve ser medida por transdutores (medir) com o objetivo de realimentar de informação o sistema de comando/controlar.

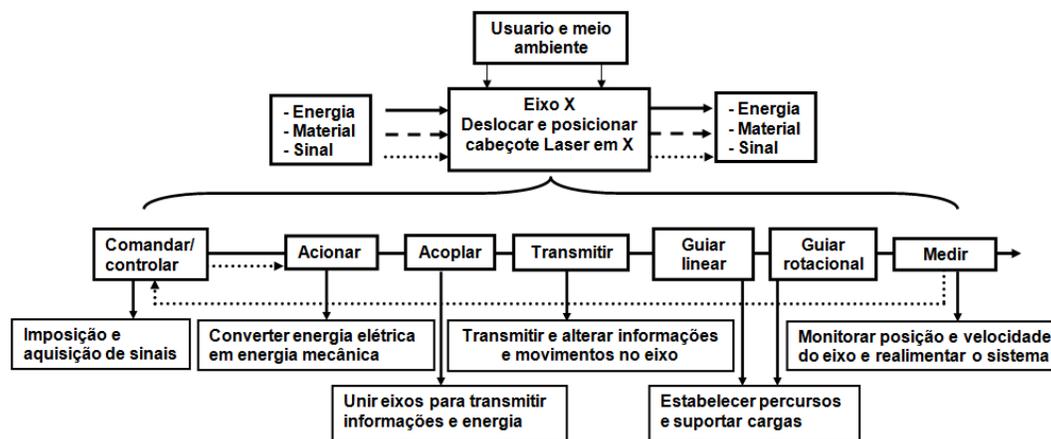


Figura 5.7 - Síntese funcional do eixo X para a máquina laser.

Já conhecidas as funções parciais do eixo X, foram procurados, avaliados e selecionados componentes (princípios de soluções) que atenderam ditas funções. A avaliação e seleção dos componentes foram baseadas nas especificações do projeto. Na Tabela 5.5 e Tabela 5.6 apresenta-se como foram avaliados e selecionados os sistemas de transmissão e as guias/mancais para o eixo X da máquina, determinando-se que as transmissões parafuso/castanha e polia/correia, e as guias/mancais com elementos rolantes atendem às especificações do projeto.

Tabela 5.5 - Avaliação dos sistemas de transmissão para o projeto do laser.

O = Atende		X = Não atende		
Avaliação das transmissões				
Especificações	Parafuso/castanha deslizante	Parafuso/castanha com rolamentos	Polia/correia	Pinhao/cremalheira
Velocidade de trabalho 0,208m/sg	O	O	O	O
Alta dinâmica de rotação	X	O	O	O
Precisão 0,01mm	X	O	O	O
Baixo custo	O	O	O	O
Inexistencia de folga mecânica	X	O	O	X

Tabela 5.6 - Avaliação de guias e mancais para o projeto de máquina laser.

O = Atende		X = Não atende		
Avaliação das guias e mancais				
Especificações	Guias e mancais deslizantes	Guias e mancais rolantes	Guias e mancais fluidicos	Guias e mancais magneticos
Velocidade de trabalho >0,208m/s	O	O	O	O
Alta dinâmica	X	O	O	O
Não requer de sistema de refrigeração	O	O	O	X
Não requer de sistemas de alguma fonte de alimentação	O	O	X	X
Não requer manutenção	O	O	X	X
Quase nula folga mecânica	X	O	O	O
Atende as dimensões do campo de trabalho	O	O	O	O

Os componentes selecionados nas tabelas apresentadas anteriormente, bem como outros não apresentados no estudo de caso, mas que atendem as especificações do projeto foram inseridos na matriz morfológica apresentada na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Matriz morfológica para o projeto de máquina laser.

Matriz morfológica para o eixo X						
Funções Parciais	Princípio de solução 1	Princípio de solução 2	Princípio de solução 3	Princípio de solução 4	Metodo de geração de concepções	Engenharia reversa
Acionar	Servomotor CC	Servomotor CA	1/2 Brushless			
Acoplar	2 Fole	Oldham	Disco			
Transmitir	2 Castanha com rolamento	1 Polia e correia				
Mancalzar	Rolamento com agulhas	Rolamentos cilindricos	2 Rolamento esfericos	Mancais alongados		
Guiar linear	Primaticas en V	Primaticas	Circulantes com 2 esferas recirculantes	1 Circulares com esferas translativas fechadas		
Monitorar	Rotativos incremental	2 Rotativos absolutos	1 Linear incremental			

Na Tabela 5.7 foram selecionados duas concepções de subsistemas (conjuntos de componentes), representadas pelos valores **1** e **2** respectivamente, onde a primeira concepção de subsistema contem um acionamento brushless, um sistema de transmissão polia/correia, guias circulares com esferas translativas fechadas e um transdutor linear incremental, entretanto a segunda concepção de subsistema contem um acionamento brushless, um acoplamento de fole, um sistema de transmissão parafuso/castanha, um mancal com rolamentos esféricos, guias circulantes com esferas recirculantes e um transdutor rotativo absoluto.

Dentre da seleção dos acionamentos, se optou por escolher o acionamento Brushless por apresentar as seguintes vantagens sobre os demais acionamentos: pode ir a rotações bem mais elevadas, não produz ruído mecânico, apresenta melhor transferência de calor ao ambiente, durabilidade muito maior, requer de muito pouca manutenção e atende à resolução exigida.

Os demais componentes apresentados na matriz morfológica pertencem às famílias dos componentes que atendem as especificações do projeto (avaliação Tabela 5.6 e Tabela 5.7), sendo todos estes componentes alternativas viáveis para compor os eixos das concepções de máquinas.

### **Atividade - 3.3 - Desenvolvimento da posição dos componentes sobre a máquina**

Para posicionar e montar os componentes sobre a estrutura, os componentes selecionados na **atividade 3.2** foram inseridos na matriz morfológica (Figura 5.8), com o objetivo de criar alternativas para alocar os componentes sobre o eixo X da concepção de estrutura de máquina tipo **E** obtida na **atividade 3.1**.

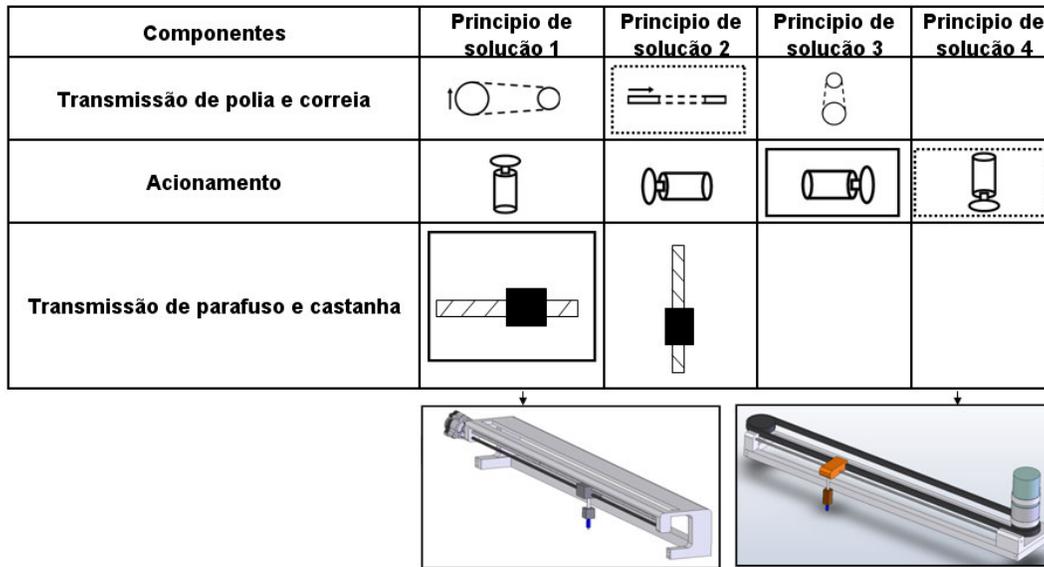


Figura 5.8 - Matriz morfológica com alternativas para alocar os componentes sobre a estrutura da máquina laser.

Com relação à Figura 5.8, foi definida a alocação dos componentes para o subsistema **1** (acionamento e sistema de transmissão polia/correia) e a alocação para os componentes do subsistema **2** (acionamento e sistema de transmissão parafuso/castanha). Uma vez definida a alocação dos componentes, estes foram montados no eixo X da estrutura **E**, permitindo formar duas concepções de máquinas (**E1** e **E2**).

Concluída a alocação dos componentes sobre a estrutura da máquina foram definidas as especificações do eixo X da concepção de máquina **E1**: dimensões para o eixo são 2.50m/0.16m/0.08m (eixo com rebaixos), material de alumínio (massa translativa tão leve quanto possível, especificação do projeto). As unidades de posicionamento para a estrutura podem ser fornecidas e pré-montadas pelo mesmo fabricante.

Os eixos X das concepções de máquinas foram representados em um *software* CAD com o objetivo de montar virtualmente as concepções de máquinas, onde se verificou que existia compatibilidade entre os eixos sem a interferência de movimento entre os eixos e os componentes da máquina (Figura 5.9 e Figura 5.10).

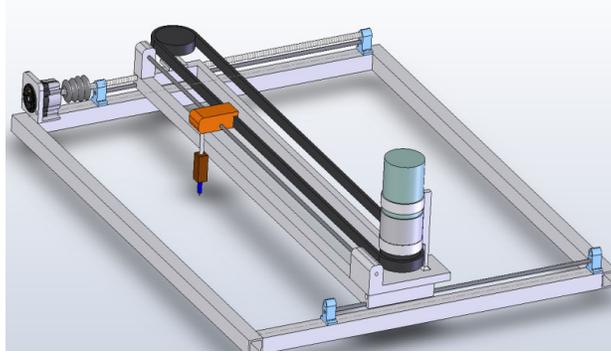


Figura 5.9 - Concepção de máquina E1.

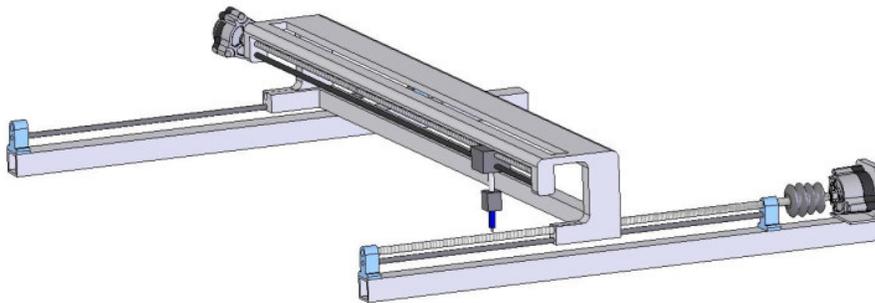


Figura 5.10 - Concepção de máquina E2.

### Atividade - 3.4 - Dimensionamento dos acionamentos e escolha do comando/controle

Nesta atividade foi dimensionado o acionamento do eixo X da concepção de máquina **E1**. Utilizando as informações técnicas dos componentes que compõem o eixo X, isto possibilitou determinar os torques necessários para vencer o atrito nas guias (regime permanente) e para acelerar as massas moveis (regime transitório).

Na Tabela 5.8 são apresentadas as informações técnicas dos componentes da concepção de máquina **E1**, onde  $m$  representa a massa translativa total sobre o eixo X (que inclui a massa do eixo Z),  $\mu_F(v)$  corresponde ao coeficiente de atrito nas guias,  $r_{R1}$  corresponde ao raio da polia acoplada ao eixo do acionamento,  $J_{GT1}$  corresponde à reação normal ao peso aplicado no eixo,  $a_x$  corresponde à aceleração e  $\eta$  ao rendimento do conjunto.

Estes valores foram substituídos nas equações que prosseguem permitindo obter o torque exigido ao acionamento para movimentar a carga segundo as especificações.

Tabela 5.8 - Informações técnicas dos principais componentes para o dimensionamento do acionamento da concepção de máquina **E1**

<b>Coefficiente</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
$m$	19,5	$Kg$
$N$	191,29	$N$
$\mu$	0,004	
$a_x$	0,216	$m/s^2$
$\eta$	0.80	
$r_{Fi}$	0,025	$m$

Para movimentar o eixo Z, a força aplicada deve vencer a inércia da massa e o atrito de rolamento das guias.

$$F_{tx} = F_{massa} + F_{atrito}$$

$$F_{tx} = m \ddot{X} + \mu N$$

$$F_{tx} = \frac{1}{\eta} (F_{ax} + F_u)$$

Força devido ao atrito de rolamento.

$$F_u = \mu \cdot N$$

$$F_u = 0.76N$$

Força necessária para acelerar a carga.

$$F_{ax} = m \cdot a_x$$
$$F_{ax} = 4,212N$$

Força total que deve proporcionar o acionamento para acelerar a carga.

$$F_{tx} = \frac{1}{\eta} (m \cdot a_x)$$
$$F_{tx} = 6,215N$$

Torque necessário para acelerar a carga

$$M_b = F_{tx} \cdot r_{Ri}$$
$$M_b = 0,15Nm$$

Determinado o torque do acionamento (*Brushless*) selecionado na **atividade 3.2**, procurou-se um modelo deste tipo de acionamento que atenderá o torque requerido. Na Tabela 5.9 é apresentado o acionamento Brushless modelo R23G escolhido para o projeto.

Tabela 5.9 - Acionamento escolhido para o eixo X da máquina laser (adaptada de Pacific, 2001)

PARAMETER	SYMBOL	UNITS	R23	
Continuous stall torque <sup>①</sup>	$T_{CS}$	Nm (lb.-in.)	0.9 (8.0)	
Peak torque <sup>④</sup>	$T_{PK}$	Nm (lb.-in.)	2.54 (22.5)	
Inertia <sup>③</sup>	$J_M$	$\text{kgm}^2 \times 10^{-3}$ (lb.-in.-sec <sup>2</sup> $\times 10^{-3}$ )	.018 (0.16)	
Static friction (max.)	$T_f$	Nm (lb.-in.)	0.03 (0.24)	
Viscous damping coefficient	$K_{DV}$	Nm/kRPM (lb.-in./kRPM)	0.006 (0.05)	
Thermal resistance <sup>⑤</sup>	$R_{TH}$	deg. C/Watt	1.27	
Thermal time constant	$\tau_{TH}$	min.	15.0	
Weight (motor only)	$W$	kg (lbs.)	1.3 (2.8)	
<b>WINDING DATA</b>			<b>G</b>	<b>H</b>
Torque constant (RMS) <sup>②</sup>	$K_T$	Nm/ $A_{RMS}$ (lb.-in./ $A_{RMS}$ )	0.6 (5.3)	0.3 (2.7)
Voltage constant (RMS) <sup>②</sup>	$K_E$	$V_{RMS}/\text{rad/sec}$ ( $V_{RMS}/\text{kRPM}$ )	0.36 (37.7)	0.18 (18.8)
Continuous stall current <sup>①</sup>	$I_{CS}$	$A_{RMS}$	1.5	3.0
Current at peak torque <sup>④</sup>	$I_{PK}$	$A_{RMS}$	4.5	9.0
Resistance (line-to-line)	$R_C$	Ohms	20.0	4.9
Inductance (line-to-line)	$L$	mH	26.0	6.5
Typical Rated Speed @ 240V ac, 320V dc bus	$W_R$	RPM	3,800	8,000
Typical Rated Torque @ 240V ac, 320V dc bus	$T_{CR}$	Nm (lb.-in.)	0.80 (7.1)	0.61 (5.4)

O *drive* selecionado para o projeto é parte integrante do conjunto do acionamento já selecionado, pois assim garante-se 100% de compatibilidade entre ambas as partes motor e *drive*

#### Tarefa 3.4.4

Para a seleção do subsistema de comando/controle, foi realizada uma avaliação das alternativas existentes no mercado com relação às especificações do projeto. Nesta avaliação determinou-se que o subsistema comando/controle de arquitetura fechada disponível no mercado atende adequadamente as especificações do projeto, já que é comum encontrar este tipo de comando/controle no mercado destinado para máquinas laser. Neste tipo de comando/controle devem ser inseridas pelo usuário as informações do controlador lógico e os parâmetros da máquina (número de eixos, resolução do encoder, valores do PDI).

Como vantagens estes comando/controles apresentam um reduzido tempo de desenvolvimento, não requer conhecimento de microeletrônica e apenas um mínimo conhecimento de programação das funções tecnológicas e miscelâneas. Dentre suas desvantagens esta seu elevado custo de aquisição e a impossibilidade de reconfigurar o processador.

### **Atividade - 3.5 - Avaliação econômica e financeira da concepção de máquina**

Nesta atividade foram avaliados economicamente os eixos X das duas concepções de máquinas **E1** e **E2** com a finalidade de analisar qual destas apresenta maior viabilidade econômica.

O eixo X da concepção de máquina **E2** apresentou um maior custo na aquisição dos componentes, pois esta concepção possui um sistema de transmissão de parafuso/castanha tendo este tipo de transmissão um custo mais elevado do que um sistema de transmissão polia/correia, como o que apresenta a concepção de máquina **E1**. Além disso, um sistema de transmissão por parafuso/castanha obrigatoriamente deve estar sustentado por mancais que permitam o movimento do parafuso somente em um grau de liberdade. Além disso, o parafuso deve estar unido ao eixo do motor por um acoplamento o qual permite a transmissão de movimento. Estes dois componentes aumentam ainda mais o custo de aquisição da concepção de máquina **E2**. Esta análise permitiu concluir que o eixo X da concepção de máquina **E1** é economicamente mais viável.

### **Atividade - 3.6 - Escolha definitiva da concepção de máquina**

Para determinar a concepção de máquina definitiva para o projeto, foi definida uma lista de critérios generalizados (Tabela 5.10) os quais permitem avaliar as concepções de máquinas. Estes critérios generalizados foram baseados nas especificações do projeto.

Tabela 5.10 - Critérios generalizados para o projeto de uma máquina Laser

Nº	Critérios generalizados adotados	Critérios específicos	Faixas dos critérios específicos
1	Dinâmicos	Massa do sistema	(-) Kg
		Inercia do sistema	(-) Kg m2
		Rigidez	(+)
		Folga	(-) um
		Resolução (eixo X)	(+) um
2	Custos	Custos dos componentes	(-) R\$
		Custo da estrutura	(-) R\$
3	Estrutura	Quantidade de componentes	(-) Unidades
		Quantidade de peças da estrutura	(-) Unidades
4	Viável tecnicamente	Disponibilidade dos componentes	(+) Unidade
5	Uso	Aprendizagem fácil	Qualitativa
		Fácil manipulação	Qualitativa
6	Estética	Adequada estética	Qualitativa
7	Segurança	Baixo riscos de acidentes	Qualitativa

Os critérios generalizados listados na Tabela 5.10 são inseridos na Tabela 5.11 com o objetivo de determinar os pesos de importância para cada deles, utilizando o método de comparação aos pares. Este método consiste em inserir os critérios generalizados na primeira fila e na primeira coluna da Tabela 5.11, com o objetivo de comparar cada um dos critérios dos outros, o que permitiu determinar qual dos dois critérios apresenta uma maior importância para o projeto. Ao critério mais importante deve-se atribuir-lhe o valor 1 e ao seu par o valor 0. Quando os dois critérios são igualmente importantes, atribui-se o valor 0,5 para cada um. Na seqüência deve-se efetuar a soma dos valores de cada linha, obtendo-se os pesos absolutos  $S_i, S_i$  (96). Por último determinaram-se os pesos relativos dos critérios utilizando a Equação 4.1 (capítulo 4).

Tabela 5.11 - Matriz de avaliação por comparação dos pesos dos critérios generalizados de seleção para o projeto de máquina laser.

		Critérios generalizados														Soma da linha	Pesos
		X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	Si	Wi
Critérios	(+) Precisão eixo X	---	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	13	0,135
	(-) Inercia	0	---	0,5	0,5	0,5	0	0	1	1	0,5	1	1	1	1	8,0	0,083
	(+) Rigidez	0	0,5	---	0	0	0	0	1	1	0,5	1	1	1	1	7	0,073
	(-) Massa	0	0,5	1	---	1	0,5	0,5	1	1	0,5	1	1	1	1	10	0,104
	(-) Viabilidade técnicas dos componentes	0	0,5	1	0	---	0,5	0,5	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	7,0	0,073
	(-) Custos dos componentes	0	1	1	0,5	0,5	---	0,5	1	1	0,5	1	1	1	1	10,0	0,104
	(-) Custos da estrutura	0	1	1	0,5	0,5	0,5	---	1	1	0,5	1	1	1	1	10	0,104
	(-) Quantidade de componentes	0	0	0	0	0	0	0	---	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	3,0	0,031
	(-) Quantidade de peças da estrutura	0	0	0	0	0	0	0	0,5	---	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	8	0,083
	(-) Folga	0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	---	1	1	1	1	8	0,083
	Aprendizagem fácil	0	0	0	0	0,5	0	0	0,5	0,5	0	---	0	1	1	3,5	0,036
	Baixo riscos de acidentes	0	0	0	0	0,5	0	0	0,5	0,5	0	1	---	1	1	4,5	0,047
	Adequada estética	0	0	0	0	0,5	0	0	0,5	0,5	0	0	0	---	0,5	2	0,021
	Fácil manipulação	0	0	0	0	0,5	0	0	0,5	0,5	0	0	0	0,5	---	2	0,021
	96																

A próxima tarefa consistiu em separar os critérios qualitativos dos quantitativos com o objetivo de valorizá-los de forma separada. Os valores quantitativos foram valorados segundo o seu atendimento a faixa dos critérios (Tabela 5.10) em uma escala de 1 a 5. Por exemplo, o eixo X da concepção de máquina **E1** apresenta uma inércia menor que o eixo X da concepção de máquina **E2** (devido à diferença entre os sistemas de transmissão). Isto provocou que o critério generalizado “(-) inércia” da concepção de máquina **E1** apresentada na Tabela 5.12 receba uma maior valoração que seu concorrente a concepção de máquina **E2** para este critério generalizado. Na Tabela 5.12 são apresentados os demais valores dos critérios quantitativos para ambas as concepções de máquinas.

Tabela 5.12 - Valoração dos critérios quantitativos para as concepções de máquina laser.

<b>Crítérios quantitativos</b>	<b>Concepção de máquina E 1 (U i,1)</b>	<b>Concepção de máquina E 2 (U i,2)</b>
<b>(+) Precisão eixo X</b>	5	5
<b>(-) Inercia</b>	4	2
<b>(+) Rigidez</b>	3	4
<b>(-) Massa</b>	5	3
<b>(-) Viabilidade técnicas dos componentes</b>	5	5
<b>(-) Custos dos componentes</b>	4	2
<b>(-) Custos da estrutura</b>	4	3
<b>(-) Quantidade de componentes</b>	4	2
<b>(-) Quantidade de peças da estrutura</b>	3	5
<b>(-) Folga</b>	3	5

Tal como os critérios quantitativos, os critérios qualitativos foram valorados segundo o seu atendimento a faixa dos critérios em uma escala de 1 a 5. Como estes critérios não são mensuráveis foi utilizada a

para verificar o valor de seu grau de atendimento ao critério. Na Tabela 5.13 são apresentados os valores adotados para cada um dos critérios qualitativos.

Tabela 5.13 - Valorização dos critérios qualitativo para as concepções das máquinas laser.

Crítérios qualitativos	Concepção de máquina E 1 ( $U_{i,1}$ )	Concepção de máquina E 2 ( $U_{i,2}$ )
Aprendizagem fácil	3	3
Baixo riscos de acidentes	4	4
Adequada estetica	3	5
Fácil manipulação	3	3

Os critérios generalizados, os valores resultantes da Tabela 5.12 e da Tabela 5.13 ( $U_{i,1}$  e  $U_{i,2}$ ) e os pesos dos critérios ( $w_i$ ) foram inseridos na Tabela 5.14. A multiplicação dos (valores e pesos) para cada um dos critérios e a posterior somas dos resultados destes determinaram o “valor de utilidade” para cada uma das concepções de máquina (Tabela 5.14).

Tabela 5.14 - Determinação do “valor de utilidade” das concepções de máquina laser.

Criterios generalizados	Pesos dos criterios $w_i$	Concepções de Máquinas			
		Concepção de máquina E 1		Concepção de máquina E 2	
		$U_{i, 1}$	$w_i \cdot U_{i,1}$	$U_{i, 2}$	$w_i \cdot U_{i,2}$
(+) Precisão eixo X	0,135	5	0,675	5	0,675
(-) Inercia	0,083	4	0,332	2	0,166
(+) Rigidez	0,073	3	0,219	4	0,292
(-) Massa	0,104	5	0,52	3	0,312
(-) Viabilidade tec. dos componentes	0,073	5	0,365	5	0,365
(-) Custos dos componentes	0,104	4	0,416	2	0,208
(-) Custos da estrutura	0,104	4	0,416	3	0,312
(-) Quantidade de componentes	0,031	4	0,124	2	0,062
(-) Quantidade de peças da estrutura	0,083	3	0,249	5	0,415
(-) Folga	0,083	3	0,249	5	0,415
Aprendizagem fácil	0,036	3	0,108	3	0,108
Baixo riscos de acidentes	0,047	4	0,188	4	0,188
Adequada estetica	0,021	3	0,063	5	0,105
Fácil manipulação	0,021	3	0,063	3	0,063
Valor da função utilidade		3,987		3,686	
Ordenação das concepções		1ª Posição		2ª Posição	

Os resultados indicam que a concepção de máquina **E1** é a ideal para o projeto por obter um “valor de utilidade” de 3,987.

#### Atividade - 4.1 - Modelagem

Nesta atividade foi modelado o eixo X da concepção de máquina **E1** (concepção de máquina definitiva para o projeto). Utilizando o procedimento

apresentado na **atividade 4.1 da sistemática** foi possível converter a representação do eixo X em um circuito generalizado eletromecânico por meio da identificação das contribuições de seus componentes no sistema (armazenamento, dissipação e conversão) baseando-se nas propriedades de um sistema de massas, elasticidades e atritos. Por exemplo, na Figura 5.11 a indutância e a resistência do servomotor se encontram em série, pois, no transiente, a tensão não é a mesma para ambos os elementos e existe uma variação sobre cada um deles. Já na parte mecânica, a inércia e o atrito viscoso se encontram em paralelo porque ambos os elementos tem a mesma velocidade rotacional. A correia (elasticidade) se encontra conectada em série já que existe uma variação de velocidade distinta em ambos extremos.

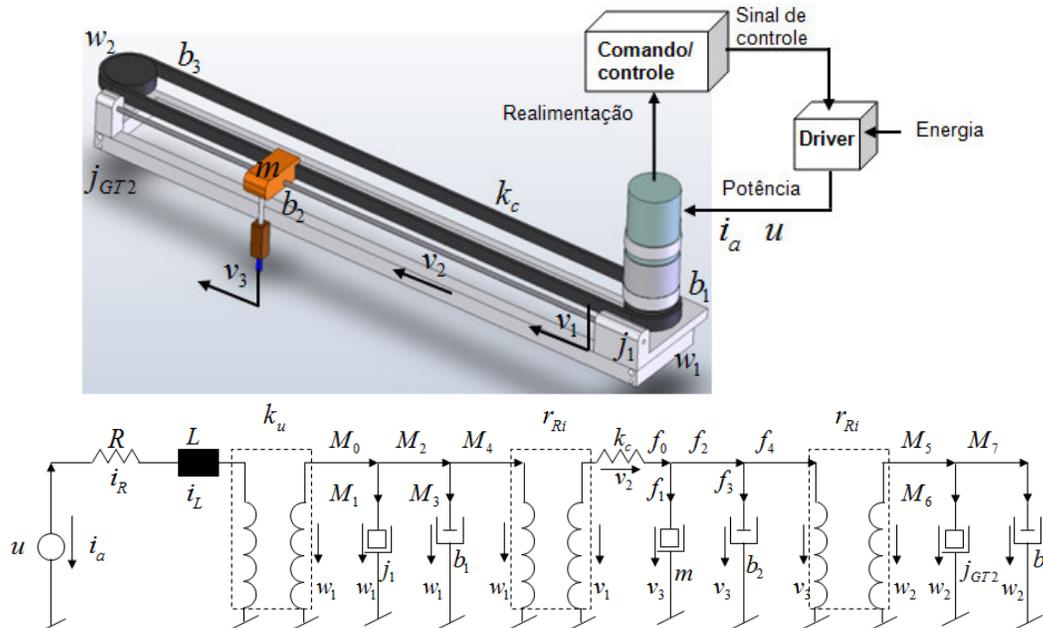


Figura 5.11 - Modelo do eixo X em circuito eletromecânico generalizado

Com relação à Figura 5.11, o processo de posicionamento do laser se inicia com uma fonte de tensão  $u$  aplicada ao enrolamento da armadura do acionamento. A resistência da armadura  $R$  e a indutância  $L$  representam a parte elétrica do acionamento. A tensão aplicada à armadura do acionamento faz circular uma corrente  $i_a$  que é transformada em torque (pela constante  $k_u$ ). Este torque  $M_0$  é utilizado para vencer a inércia  $j_1$  e o atrito  $b_1$  do eixo do

acionamento, o torque restante  $M_4$  à saída do acionamento é convertido na força  $f_0$  por meio da polia na correia  $r_{Ri}$ , força que é utilizada para tracionar a correia sincronizadora  $k_c$ , e daí movimentar a carga do eixo  $m$  (posicionar o cabeçote laser) e vencer o atrito das guias  $b_2$ . Parte desta força  $f_0$  é convertida novamente em torque  $M_5$  utilizado para vencer a inércia  $j_{GT2}$  e o atrito  $b_3$  da polia auxiliar (polia louca) do sistema de transmissão. Na Tabela 5.15 são apresentados em detalhe os componentes e as grandezas físicas utilizadas na modelagem do eixo X.

Tabela 5.15 - Simbologia dos componentes e das grandezas físicas participantes na modelagem do eixo X.

$i_a$	Corrente de alimentação no enrolamento da armadura	$A$
$R$	Resistência do enrolamento da armadura	$\Omega$
$u$	Tensão aplicada na armadura do servomotor	$V$
$i_L$	Corrente sobre a indutância	$A$
$i_R$	Corrente sobre a resistência	$A$
$k_u$	Constante de torque do servomotor	$Nm / A$
$M_0$	Torque eletromecânico do servomotor	$Nm$
$M_1$	Torque para vencer a inércia do eixo do servomotor	$Nm$
$M_3$	Torque para vencer o atrito do eixo do servomotor	$Nm$
$M_4$	Torque disponível para movimentar a carga	$Nm$
$j_1$	Inércia total aplicada ao eixo do servomotor	$Kgm^2$
$b_1$	Coefficiente de atrito do eixo do servomotor	$Nm / rad / sg$
$w_1$	Velocidade angular da polia acoplada ao servomotor	$Rad / s$
$r_{Ri}$	Raio da polia acoplada ao servomotor	$m$

Tabela 5.15 - Simbologia dos componentes e das grandezas físicas participantes na modelagem do eixo X (continuação).

$k_c$	Constante elasticidade da correia sincronizadora	$N / m$
$k_{cx}$	Ganho do transdutor da corrente à armadura	$V / A$
$v_1$	Velocidade da correia à polia acoplada ao servomotor	$m / s$
$v_2$	Varição da velocidade ao longo da correia	$m / s$
$v_3$	Velocidade do dispositivo LASER	$m / s$
$f_0$	Força total aplicado na correia do eixo	$N$
$f_1$	Força para movimentar a massa total do eixo a ser	$N$
$f_3$	Força para vencer o atrito viscoso nas guias	$N$
$f_4$	Força aplicada na polia da unidade de desvio	$N$
$m$	Massa total sobre as guias	$kg$
$b_2$	Coefficiente de atrito viscoso sobre as guias	$Nm / rad / sg$
$M_5$	Torque para mover a polia da unidade de desvio	$N / m$
$M_6$	Torque para vencer a inércia da polia de desvio	$N / m$
$M_7$	Torque para vencer o atrito da polia de desvio	$N / m$
$J_{GT2}$	Inércia da polia da unidade de desvio	$Kgm^2$
$b_3$	Coefficiente de atrito da polia da unidade de desvio	$Nm / rad / sg$
$w_2$	Velocidade angular da polia da unidade de desvio	$Rad / s$

A partir da representação do eixo X em circuito eletromecânico (Figura 5.11) os modelos do sistema foram reformulados para impedâncias ou admitâncias dependendo da grandeza de entrada e saída. A substituição das propriedades foi baseada nas tabelas apresentadas (ver Apêndice A - “Elementos de diagramas de blocos para elementos de circuito”). Estas tabelas detalham quando uma massa, elasticidade ou atrito deve ser representada em admitância ou impedância. Na Figura 5.12 o eixo X da concepção de máquina é apresentado em um modelo de diagrama de blocos (formal).

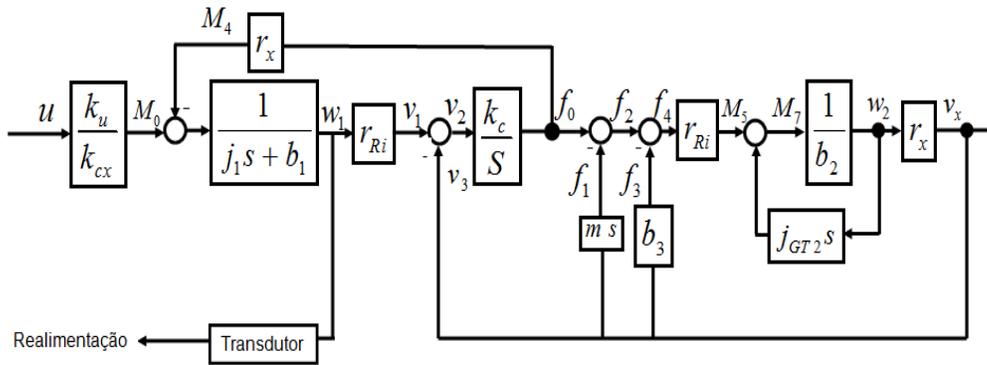


Figura 5.12 - Modelo dinâmico em diagrama de bloco (formal) parte do eixo X.

**Atividade - 4.2 - Simulação**

Para finalizar a sistemática o eixo X representado em um modelo em de diagrama de blocos (Figura 5.12) foi modificado para um diagrama de blocos compatível com uma linguagem de *software* de simulação (Simulink) como é apresentado na Figura 5.13. Este diagrama de blocos apresenta um controlador P e um sensor de velocidade. As impedâncias, admitâncias e ganhos da Figura 5.12 foram substituídos pelas funções de transferência oferecidas pela biblioteca do software Simulink utilizado para este estudo de caso. Os valores dos elementos que compõem o modelo (Figura 5.13) são apresentados na Tabela 5.16.

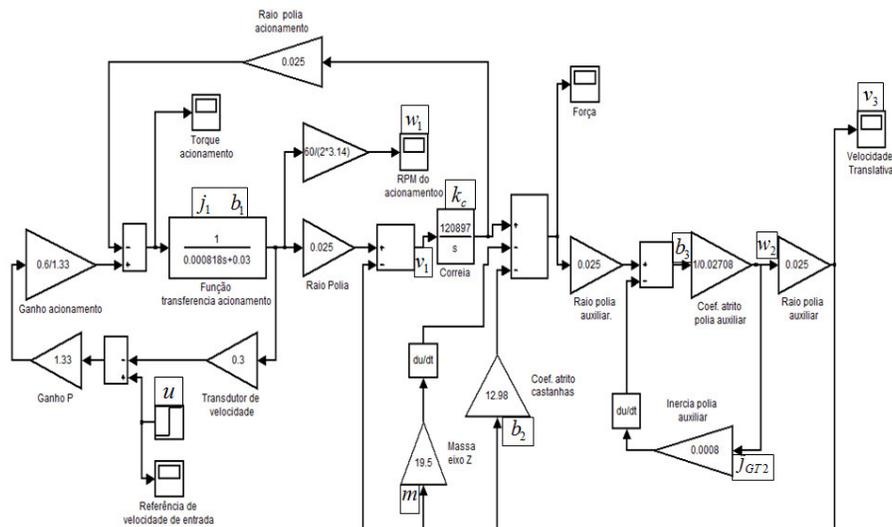


Figura 5.13 - Modelo dinâmico do eixo X implementado como diagrama de programação para Simulink de MatLab.

Tabela 5.16 - Valores dos elementos que compõem o modelo do eixo X.

Coefficiente	Valor	Unidade
$k_u$	0,6	$Nm/A$
$k_{cx}$	1,33	$V/A$
$j_1$	0,00081	$Kgm^2$
$b_1$	0,03	$Nm/rad/s$
$k_c$	120.897	$Nm/m$
$b_2$	0,027	$Nm/rad/s$
$j_{GT2}$	0,0008	$Kgm^2$
$m$	19.5	$Kg$
$b_3$	12.98	$Nm/m/s$
$r_{Ri}$	0,025	$m$

Na Figura 5.14 são apresentados os resultados da simulação para um degrau de 0-10 V aplicado no instante de tempo zero, como referência de velocidade.

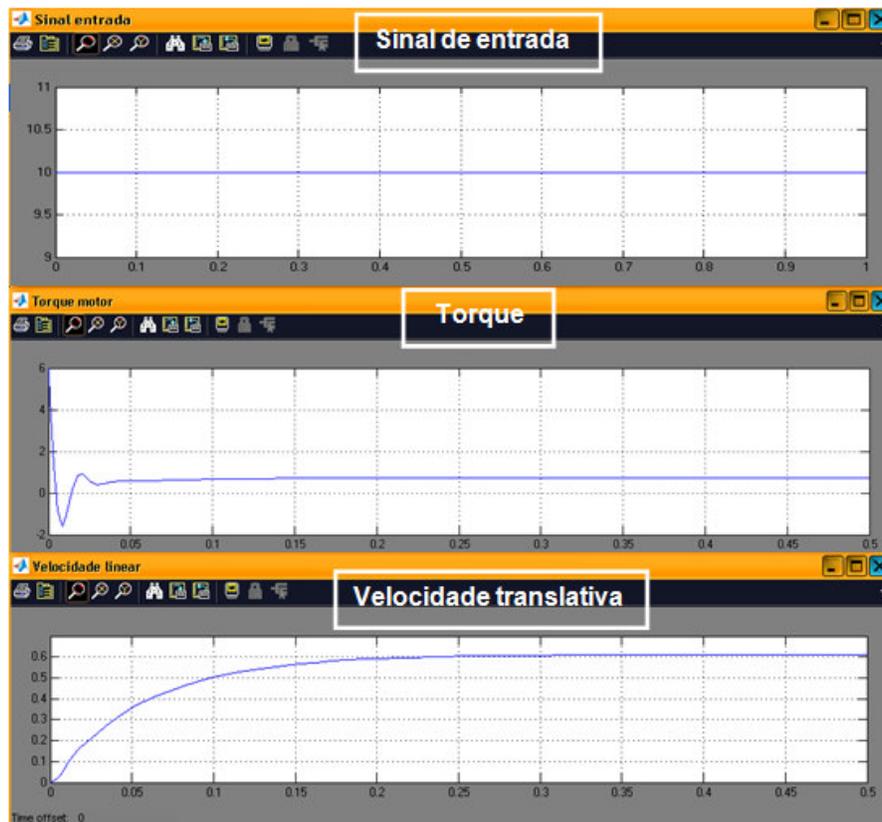


Figura 5.14 - Simulação do eixo X com realimentação de velocidade e um controlador tipo P.

Como resultado da simulação apresentada na Figura 5.14 pode-se concluir que o posicionador (laser) atingiu uma velocidade de trabalho de 0,208 m/s em um tempo de resposta de menor a 0,96 s como o especificado para o projeto (ver gráfico da velocidade translativa). O acionamento atingiu um torque pico de 6 Nm durante o regime transitório atendendo à especificação do projeto (ver gráfico de torque). O tempo de resposta (regime transitório) foi atingido em 0,3 s, após o que, o torque se estabiliza e só atua vencendo o atrito das guias quando o laser já se encontra no processo de corte, atendendo também a estas especificações do projeto.

## Capítulo 6 - Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Nesse capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho e algumas sugestões que orientarão a realização de novos trabalhos os quais podem ser desenvolvidos baseando-se em algumas atividades da sistemática proposta.

### 6.1 - Conclusões

Pode-se concluir do presente trabalho que a estrutura da sistematização permite acelerar os processos de desenvolvimento do projeto ao apresentar uma visão abrangente das primeiras fases de projeto (planejamento de produto, projeto informacional, conceptual e preliminar). Isto permite estabelecer um planejamento mais organizado das atividades a ser desenvolvidas e realizar procedimentos antecipados sobre as atividades futuras. Como, por exemplo, a pesquisa de informações relacionadas com viabilidade técnica e custos dos componentes, as novas tecnologias disponíveis no mercado, conhecimento sobre o funcionamento de máquinas iguais ou similares e os componentes que compõem estas, a aprendizagem antecipada de *software* de simulação, desenho e programação.

A estrutura da sistemática permitiu estabelecer e classificar as especificações de projeto segundo o tipo de especificação (dinâmica, básica, estrutural e do ciclo de vida), importância (obrigatória ou desejável) e valor meta (quantitativa ou qualitativa) (atividade 2.1 estudo de caso), este tipo de ordenamento permite uma análise mais minuciosa sobre as especificações relevantes para o projeto; os componentes dos subsistemas que compõem uma máquina automatizada puderam ser procurados (novas tecnologias, componentes de máquinas similares, componentes disponível no mercado) e classificados segundo sua função principal (transmitir, guiar, medir, acionar, etc.), e segundo suas características técnicas, dinâmicas e dimensionais.

Os métodos de geração de concepções (*brainstorming*, MESCRAI, etc.) permitiram criar estruturas novas para as concepções de máquinas (Figura 5.6) e realizar melhorias em componentes (exemplos da utilização do método

MESCRAI e listagem de atributos apresentados na atividade 3.3 da sistemática). Além disso, estes métodos orientam a geração de alternativas para posicionar os componentes sobre os eixos da máquina (Figura 5.8).

Os métodos de avaliação e seleção permitiram escolher estruturas e componentes viáveis para o projeto analisando as características destes com relação às especificações de projeto (Tabela 4.4, Tabela 4.5, Tabela 5.5 e Tabela 5.6).

Métodos como a matriz morfológica (matriz de combinação de componentes) permitiram combinar os diferentes componentes dos subsistemas para montá-los sobre as estruturas de máquinas predefinidas (Tabela 5.7), para assim constituir as distintas concepções de máquinas para o projeto. Estas combinações de componentes permitem obter várias concepções de máquinas concentrando esta escolha principalmente na combinação de distintos componentes.

O dimensionamento dos acionamentos das concepções de máquina foi possível realizá-lo com a utilização das equações apresentadas na atividade 3.4 da sistemática, as quais permitiram obter o torque do acionamento na atividade 3.4 do estudo de caso. Os valores utilizados e obtidos são apresentados na atividade 3.4 do estudo de caso.

É possível diminuir os custos de aquisição das concepções de máquinas, analisando os custos individuais dos componentes que compõem as concepções de máquinas (Tabela 4.17), também foi possível comparar os custos de aquisição aproximados entre as concepções de máquina (atividade 3.5 do estudo de caso).

Finalmente a sistemática permitiu escolher uma concepção de máquina definitiva por meio da valoração de critérios quantitativos e qualitativos (atividade 3.6 do estudo de caso).

Pode-se concluir que a sistemática oferece a opção de desenvolver várias concepções de máquina, incluso concepções inovadoras. Ao final do projeto várias destas concepções podem apresentar um nível de qualidade desejada maior ou igual ao esperado. Estas alternativas favorecem a possibilidade de poder obter projetos de máquina altamente competitivos.

## 6.2 - Sugestões para trabalhos futuros

Seguem as sugestões para trabalhos futuros: Implementar um sistema especialista que classifique os subsistemas e componentes que compõem uma máquina automatizada em relação a suas informações funcionais, dinâmicas (atrito, precisão, etc.), construtivas, técnicas e dimensionais (Figura 6.1). Isto permitiria ao projetista procurar os componentes adequados para o projeto de máquina, baseando-se nas especificações de projeto. Um sistema especialista pode ser freqüentemente atualizado com novas tecnologias e outras informações relevantes. Como vantagem este sistema aceleraria o processo de procura de princípio de soluções para o projeto.

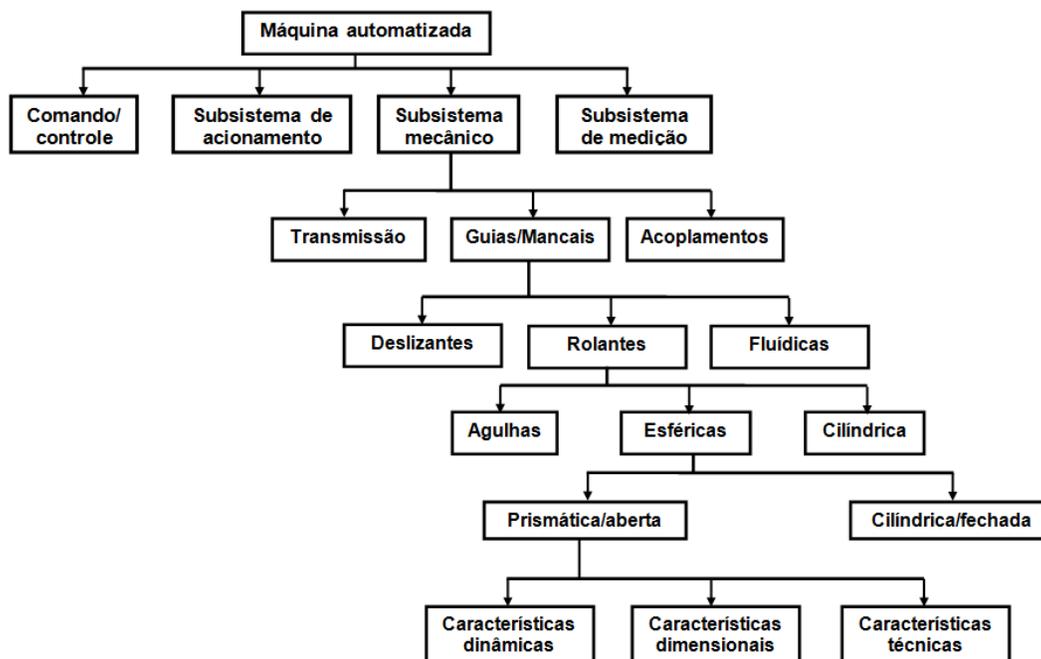


Figura 6.1 Desdobramentos dos subsistemas que compõem uma máquina automatizada para um sistema especialista

Utilizar a estrutura da sistemática para adaptá-la para projetos de robótica (não somente plano cartesiano) ou para projetos de aparelhos e instrumentos automatizados “pequenas máquinas”. Para isto devem se tomar medidas necessárias para atender as diferenças, como por exemplo, em robótica, os movimentos dos eixos saem do plano cartesiano pelo que as equações utilizadas para calcular os dimensionamentos dos acionamentos são

outras. Os componentes utilizados para “pequenas máquinas” são menores, por exemplos, engrenagens plásticas com raios na faixa de centímetro e os motores são para torques menores e dinâmicas mais elevadas. As atividades 3.1, 3.2, 3.3, 3.5 e 3.6 da sistemática podem não requer modificações para adaptá-la para uma nova sistemática deste tipo.

As atividades da sistemática podem ser expandidas melhorando os procedimentos existentes ou criando outros novos que permitam desenvolver projetos de forma mais detalhada e com outras variantes. Por exemplo, na atividade 3.5 são só analisados os custos dos componentes e da estrutura da máquina, mas pode-se implementar um procedimento que permita analisar todos os custos básicos e do ciclo do vida da máquina (gestão de manutenção, montagem, operação da máquina, consumo de energia, peças de reposição, etc.); na atividade 3.3 é realizado o projeto da montagem dos componentes sobre os eixos da máquina e depois estes são unidos, mas esta atividade pode ser acrescentada considerando outros componentes dependendo das funcionalidades desta (portas da carcaça, porta-painéis para os componentes de comando/controle, janelas, porta-ferramenta, etc.), Pode, também, implementar atividades que permitam incrementar a estrutura da sistemática, por exemplo, implementar uma atividade enfocada na função principal da máquina (corte, perfuração, impressão, etc.) a qual considere alternativas de ferramentas para realizar o corte o a perfuração, ou a implementação de outros sistemas que complementem as funções principais um sistema de lubrificação e refrigeração para máquinas de usinagem.

Outros exemplos são implementar um programa de manutenção preditiva e de confiabilidade para os componentes mais comuns que compõem as máquinas automatizadas, ou desenvolver atividades na fase do projeto detalhado que permitam estabelecer tarefas para a construção e testes do protótipo da máquina.

## Referências Bibliográficas

BACK, Nelson; OGLIARI, André; DIAS, Acires; DA SILVA, Jonny Carlos. **Projeto integrado de produtos**, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Manole, 2008.

BAXTER, M. **Projeto de produto: guia pratica para o desenvolvimento de novos produtos**. Tradução de Itiro lida, São Paulo, Edgar Blucher, 1998.

BRENES, ARTURO. **Modernização e análise dinâmica de uma máquina-ferramenta NC**, Dissertação (mestrado), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1994.

COOPER, R.G. **Selecting winning new product projects: using the NewProd system**. Journal of Product Innovation Management 2:34-44,1985.

FABRYCKY, W. J.; BLANCHARD, B. S. **Life cycle cost and economic analysis**. New York, Prentice-Hall, 1991.

FONSECA, HERNANDEZ. **Desenvolvimento de uma sistemática para a obtenção das especificações de projetos de produtos industriais**. Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1996.

FONSECA, HERNANDEZ. **Sistematização do processo de obtenção das especificações de projeto de produtos industriais e sua implementação computacional**. Tese (Doutorado), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

GROSS, H. **Electrical Feed Drives for Machine Tools**, Berlin; München: Siemens – Aktiengesellschaft; Chichester: Wiley, 1983.

HEBB, Harry B. **Can Old Workhorses Still Pull their Weight?**, **Manufacturing engineering**, Vol. 102, Nº 4 Abril, 1989.

KOLLER, R. **Konstruktionsmethode für des Maschinenbau**. Heidelberg, Springer Verlag, 1985.

LEONEL, CARLOS. **Sistematização do processo de planejamento da inovação de produtos com enfoque em empresas de pequeno e médio porte**. Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

LICHTBLAU, MARCO. **Uma contribuição ao estudo da dinâmica de posicionadores**, Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1989.

MARTIN, C. A. **Curso de sistema de controle e sua dinâmica**. Apostila do curso do Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1993.

MARTIN, C. A. **Acionamentos de avanço para máquinas ferramenta**. Apostila de curso – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1996.

MARTIN, C. A. **Manuscritos não publicados**. Apostila de curso – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005

MORIWAKI, T. Multi-functional machine tool, **Elsevier**, Neyagawa, Japan, 09/2008, p. 737-738.

NEUGEBAUER, R.; DENKENA, B.; WEGENER, K. Mechatronic Systems for Machine Tools, **Elsevier**, Zurich Switzerland, 10/2008, P 659-660.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 2ª Edição, Rio de Janeiro: Editora Prentice Hall do Brasil Ltda., 1993.

OTTO, K. N.; WOOD, K.L. **Product design: Techniques in reverse engineering and new product development**. New Jersey, Prentice Hall, 2001.

PACIFIC, Cientific; **High Performance Servo motors**. março, 2001.

PAHL, Gerhard; BEITZ, Wolfgang. **Engineering design: a systematic approach**. Glasgow, Springer Verlag, 1996.

PAHL, Gerhard, BEITZ, Wolfgang. **Projeto na Engenharia**, tradução por Hans Andreas Werner. 6ª edição alemã, 2004.

BURGOA, PIMENTEL DAVID. **Bancada de ensaios para acionamentos eletromecânicos fracionários rotativos**, Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1996.

BURGOA, PIMENTEL DAVID. **Análise e desenvolvimento de um sistema impressor Raster de formato extra-largo**. Tese (Doutorado), Departamento de Engenharia mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

RAUDSEPP, R. **“Stimulating creative thinking”**. Machine Design. Jun/1983, p. 75-78.

RODENACKER, W. G. **Methodisches Konstruieren**. 4ª edição, Berlin, Springer Verlag, 1991.

ROMANO, LEONARDO. **Modelo de referência para o processo de desenvolvimento de máquinas agrícolas.** Tese (Doutorado), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

ROTH, K. **Konstruieren mit Konstruktions Katalogen,** Berlin, Springer Verlag, 1982

SANDIN, Paul E. **Robot mechanisms and mechanical devices illustrated,** United States of America, McGraw-hill, 2003.

SIMON, Alexandre Tadeu. **Retrofitting e Reforma, duas Formas de melhorar a produção. Maquinas e Metais,** Vol. 25, Nº 297, Outubro, 1990

STOETERAU, RODRIGO. **Desenvolvimento do protótipo de uma máquina-ferramenta comandada numericamente para usinagem de ultra-precisão com ferramenta de geometria definida,** Teses, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

SYNRAD. **Calculadora para laser.** Disponível em:  
<http://www.synrad.com/Applications/configurations.htm>. Acesso em: 2007.

TAKATSU, H.; ITOH, T.; ARAKI, M. **Future needs for the control theory in industries – Report and topics of the control technology survey in the Japanese industry.** Journal of Process Control. 8 (5-6): 369-374, 1998.

## **Apêndice A**

### **Ferramentas para a modelagem e simulação da máquina**

#### **Grandezas físicas de um e dois pontos**

As grandezas físicas tais como velocidade, deslocamento, tensão elétrica, são denominadas grandezas variáveis de dois pontos, pois para sua determinação (ou para sua medição ideal), são necessários dois pontos espaciais do sistema. Na maioria dos casos um destes pontos é utilizado como ponto (ou nível), ou valor de referência. As grandezas físicas fundamentais, força, impulsão, corrente elétrica são denominadas grandezas de um ponto, para medi-las idealmente em dado ponto do espaço basta somente um único ponto. Uma admitância vai ser identificada por ter uma grandeza de um ponto no numerador e uma grandeza de dois pontos no denominador, para as impedâncias será o inverso.

#### **Elementos de diagramas de blocos para elementos de circuito**

Nas Tabelas A.1, A.2 e A.3 são apresentados os diagramas de blocos para sistemas mecânicos translacional, mecânicos rotativos e elétricos. Estes diagramas de blocos durante a atividade de modelagem e simulação permitem representar de forma gráfica a estrutura de sistemas dinâmicos, ressaltando as dependências funcionais que definem o comportamento do sistema. Diagramas de blocos registram os fluxos de sinais existentes nos diversos pontos do espaço ocupado pelo sistema. Os blocos funcionais contem as relações entre as respectivas variáveis de entrada e saída.

Tabela A.1 - Diagrama de blocos para sistemas mecânicos translacionais.

Propriedades do sistema	Símbolo circuito	Impedância	Admitância	Símbolos do diagrama de blocos
Elasticidade		$\frac{s}{k}$	$\frac{k}{s}$	
Massa		$\frac{1}{m \cdot s}$	$m \cdot s$	
Atrito		$\frac{1}{b}$	$b$	

Tabela A.2 - Diagrama de blocos para sistemas mecânicos rotativos.

Propriedades do sistema	Símbolo circuito	Impedância	Admitância	Símbolos do diagrama de blocos
Elasticidade		$\frac{s}{k}$	$\frac{k}{s}$	
Inércia		$\frac{1}{j \cdot s}$	$j \cdot s$	
Atrito		$\frac{1}{b}$	$b$	

Tabela A.3 - Diagrama de blocos para sistema elétrico.

Propriedades do sistema	Símbolo circuito	Impedância	Admitância	Símbolos do diagrama de blocos
Indutância		$L \cdot s$	$\frac{1}{L \cdot s}$	
Condensador		$\frac{1}{C \cdot s}$	$C \cdot s$	
Resistência		$R$	$\frac{1}{R}$	

### Algoritmo controlador de movimentos (PID)

O controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo) segundo TAKATSU & ARAKI (1998), é um controlador de estrutura fixa utilizado em aplicações industriais. Um controlador PID é composta da soma de três ações: uma proporcional (P), uma integral (I) e uma derivativa (D), na sua forma mais simples, todas as ações se encontram atuando de forma paralela sobre o sistema. Na Tabela A.4 são apresentadas algumas características de um PID Segundo Burgoa (2004).

Tabela A.4 - Características de um PID

Algoritmo controlador de movimento	Ganho	Atua na rapidez de resposta do sistema fechado, atua sobre a rigidez, precisão e estabilidade do sistema, comporta-se como se fosse uma mola comprimida expandindo-se num sistema mecânico, um controlador com um valor de (P) zero ou muito baixo, não é capaz de manter o eixo posicionado e torna muito lenta a resposta, incrementando (P), a rigidez de controle aumenta e melhora a rejeição às perturbações de torque. porém, um valor muito alto pode resultar em instabilidade.
	Derivador	Atua sobre o amortecimento do sistema com o objetivo de corrigir os efeitos do transitório, esta componente de controle comporta-se como se fosse um amortecimento em um sistema mecânico, o termo derivativo (D) atua sobre o amortecimento do sistema, à medida que se incrementa este ganho, diminuem as oscilações do sistema tornando-o mais estável porém, se o incremento for muito alto o sistema torna-se sobre-amortecido aumentando o tempo de resposta.
	Integrador	Acelerar a resposta do sistema e para diminuir o erro em regime permanente, mas, valores grandes do ganho proporcional podem levar o sistema a oscilar, a ação integral tem como principal vantagem permitir a operação dos sistemas com erro de seguimento nulo frente a referências e perturbações constantes, a ação derivativa é utilizada para corrigir os efeitos do transitório e tem um caráter preditivo. Segundo RICO (2003) o controle PI pode ser usado com sucesso em processo de primeira ordem estável e o PD com processos integradores, quando a dinâmica do processo for de segunda ordem o de primeira com atraso, o controle PID sempre permite obter melhores soluções que o PI ou PD.