

CLÁUDIO JOSÉ WEBER

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ESPECIALISTA PARA
SELEÇÃO DE COMPONENTES MECÂNICOS**

São Paulo

2017

CLÁUDIO JOSÉ WEBER

**Desenvolvimento de um Sistema Especialista para Seleção de
Componentes Mecânicos**

Tese de doutorado apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção de Título de Doutor em
Ciências.

Área de Concentração: Engenharia
Mecânica de Projetos de Fabricação

Orientador: Professor Dr. Gilberto
Francisco Martha de Souza

São Paulo

2017

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Weber, Cláudio José

Desenvolvimento de um Sistema Especialista para Seleção de Componentes Mecânicos / C. J. Weber -- versão corr. -- São Paulo, 2017. 237 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1.Projeto Mecânico 2.Sistemas Especialistas 3.Engenharia Mecânica (componentes) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II.t.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus,
a minha família e minha filha
Marina.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus e todos os seres de luz pela inspiração, intuição e proteção que permitiram avançar nesta etapa da minha vida;

Gostaria de agradecer a minha família, que sempre esteve comigo e espero retribuir o apoio e confiança com a realização deste trabalho, especialmente aos meus pais, Adrian e Julieta, que sempre acreditaram em mim.

A minha filha Marina pelo amor incondicional, e pela compreensão da minha ausência para a realização deste trabalho;

A Noemy, uma mestra que sempre se mostrou disposta a ensinar com amor e dedicação as lições mais importantes;

Ao Prof. Dr. Gilberto Francisco Martha de Souza, que me orientou, pela confiança, amizade e atenção com que me ajudou a conduzir este trabalho de pesquisa;

A Maria Eliza pelo apoio, presteza e o carinho tão importantes nesta jornada;

A Terezinha e a Janete pelo apoio, suporte e as construtivas trocas de ideias;

Aos meus amigos Eduardo, Erick, Edson e Alencar, obrigado pelo apoio, os momentos de alegria e pela grande amizade que perdura;

Aos meus colegas e amigos do Laboratório de Confiabilidade Arthur, Mateus, Marjorie, Khalil e Lucia que sempre se mostraram prestativos quando precisei e pelos quais sinto apreço e gratidão, e a todos os colegas do programa DINTER;

A todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho;

Ao Programa de Doutorado Interinstitucional (DINTER) entre o Instituto Federal de Santa Catarina e a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e a CAPES, pela bolsa de estudos concedida durante parte do desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

A seleção de componentes mecânicos não é uma tarefa fácil e exige um substancial *know-how* e experiência. As ferramentas atuais trabalham de forma isolada umas das outras, além disto não levam em consideração os requisitos que a interface de um componente exige do outro onde se acoplará, e por consequência os custos de fabricação e logísticos envolvidos para a compatibilização das interfaces. Para auxiliar neste processo está sendo proposto um método para desenvolver um SE (Sistema Especialista) para a seleção de componentes mecânicos que além de levar em conta os requisitos de aplicação, também considera no processo de seleção as deficiências supracitadas. Outro aspecto é que, leva em conta as diretrizes do projeto e os recursos de fabricação da planta, e em paralelo ao processo de seleção também pode dimensionar os componentes selecionados e as interfaces das peças nas quais se acoplarão.

O processo de aquisição do conhecimento é uma das principais etapas de desenvolvimento de um SE é considerado como um dos estágios mais importantes em sua execução. Em função disto está sendo proposto um método alternativo que permite que o conhecimento seja adquirido de forma sistemática e organizada pelo engenheiro do conhecimento e pelo especialista para o seu emprego na construção da base de dados do SE.

O SE desenvolvido com base no método de aquisição de conhecimento proposto neste trabalho é validado através de dois casos exemplo, inseridos em um projeto de uma máquina de processamento de papel. A validação se dá através da análise de especialistas quanto à adequação dos componentes selecionados pelo SE, comparando-os com o projeto atual. Como resultado, observa-se uma substancial redução dos custos de projeto em função dos componentes selecionados, além da economia no tempo gasto pelos projetistas neste processo de seleção.

Palavras-chave: seleção de componentes, projeto de máquinas, sistema especialista

ABSTRACT

Selecting mechanical components is not an easy task and requires a substantial amount of knowledge and experience. The current component selecting tools do not work in an integrated manner, not taking into account component interface requirements for coupling it to another component and, consequently, not considering manufacturing and logistic costs for the interfaces compatibility. In order to improve this process, this thesis proposes a method for the development of an ES (Expert System) for mechanical components selection, which considers both application and component interface requirements. Additionally, the ES will also take into consideration design guidelines and the manufacturing plant capabilities, so it will also be able to scale the selected components and its interfaces.

The process of knowledge acquisition is one of the main stages of the ES development and is considered as one of the most important stages in its execution. As a result of this, an alternative method is proposed that allows the knowledge to be acquired in a systematic and organized way by the knowledge engineer and the specialist for its use in the construction of the ES database.

The ES developed based on the proposed knowledge acquisition method is validated through two case studies in a paper processing machine design. The validation is done through the analysis of experts regarding the suitability of the components selected by the ES, comparing them with the current project. As a result, there is a substantial reduction in design costs due to the selected components, as well as the savings in the time spent by the designers in this selection process.

Keywords: Component selection, machine design, expert systems

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Exemplo de uma DSM	7
Figura 2-2: Exemplo de modelagem baseada em <i>features</i>	19
Figura 3-1: Fluxograma de atividades para a implementação do método.....	32
Figura 3-2: Fluxograma de atividades para a especificação do SE.....	33
Figura 3-3: Fluxograma para o desenvolvimento da arquitetura do SE	37
Figura 3-4: Fluxograma de integração da arquitetura do SE.....	38
Figura 3-5: Fluxograma de funcionamento do módulo de seleção do SE	46
Figura 3-6: Fluxograma para a aquisição do conhecimento.....	54
Figura 3-7: Tipos construtivos e características de aplicação dos rolamentos.....	61
Figura 3-8: Comparativo de diferentes tipos de classes de componentes do grupo funcional transmissão de potência	62
Figura 3-9: Exemplo de superfícies que são interfaces de um rolamento de rolo cônico.....	67
Figura 3-10: <i>Features</i> necessárias na barra trefilada para acomodar a chaveta	72
Figura 4-1: Elementos de um mancal de rolamento, e tipos de elementos rolantes	86
Figura 4-2: Bucha de deslizamento, bucha auto lubrificante e montagem de bucha sobre eixo.....	87
Figura 4-3: Elementos de uma corrente de transmissão e seu engrenamento na engrenagem	88
Figura 4-4: Elementos de uma correia em V e seu acoplamento na polia	89
Figura 4-5: Elementos de uma correia micro V e seu acoplamento na polia	89
Figura 4-6: Elementos de uma correia sincronizada e seu engrenamento na polia.....	90
Figura 4-7: Engrenagem helicoidal, cônica de dentes retos e coroa e sem fim	91
Figura 4-8: Chaveta com sua montagem em um eixo e cubo	91
Figura 4-9: Bucha QD e TL com suas montagens em uma polia.....	92
Figura 4-10: Anéis de fixação tipo 1, 3 e 4, e exemplo de montagem de um anel em uma polia.....	93
Figura 4-11: Eixos maciços e tubulares	93

Figura 4-12: Interfaces dos rolamentos rígido de esfera, auto compensador de esfera, compensador de rolos e de rolos	105
Figura 4-13: Interfaces dos rolamentos de esfera de contato angular e de rolos cônicos	105
Figura 4-14: Interfaces dos rolamentos autocompensador de esferas e autocompensador de rolos com bucha H.....	106
Figura 4-15: Interfaces dos rolamentos autocompensador de esferas e autocompensador de rolos com bucha AH	106
Figura 4-16: Interfaces dos mancais de rolamento rígido de esferas Y e com Bucha H	107
Figura 4-17: Interfaces dos mancais de rolamentos autocompensador de esferas e autocompensador de rolos com bucha H.....	107
Figura 4-18: Interfaces do rolamento axial de esferas e do rolamento axial de esferas de dupla carreira.....	108
Figura 4-19: Interfaces das buchas radiais, buchas axiais e buchas radial e axial.....	108
Figura 4-20: Interfaces de uma chaveta.....	109
Figura 4-21: Interfaces os anéis de fixação tipo 1, 3 e 4	109
Figura 4-22: Interfaces das buchas QD e TL.....	110
Figura 4-23: Interface de um eixo maciço e um tubular	110
Figura 4-24: Interfaces dos componentes de transmissão.....	111
Figura 5-1: Conjunto cilindro gofrador de aço	121
Figura 5-2: Conjunto cilindro gofrador de aço, lado esquerdo, projeto atual	122
Figura 5-3 - Interface de entrada com as configurações	124
Figura 5-4 - Interface de entrada requisitos de aplicação fixação cubo-eixo.....	125
Figura 5-5 - Interface de entrada requisitos de aplicação fixação cubo-eixo.....	126
Figura 5-6: Conjunto cilindro gofrador de aço, lado esquerdo, projeto proposto.....	132
Figura 5-7: Conjunto transmissão do desbobinador, projeto atual	137
Figura 5-8: Conjunto transmissão do desbobinador, detalhe da transmissão.....	139
Figura 5-9: Eixo conjunto transmissão do desbobinador, projeto atual.....	139
Figura 5-10: Conjunto transmissão do desbobinador, detalhe da fixação da polia.....	140
Figura 5-11: Polia conjunto transmissão do desbobinador, projeto atual	140
Figura 5-12: Polia conjunto transmissão do desbobinador, alternativa proposta	160

Figura 5-13: Conjunto transmissão do desbobinador, alternativa 2 proposta.	160
Figura 5-14: Conjunto transmissão do desbobinador, alternativa 2 proposta	161
Figura 5-15: Conjunto transmissão do desbobinador, alternativa 1 proposta.	162

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 - Documentos e ferramentas de apoio para o desenvolvimento do método	34
Tabela 3-2: Comparação entre índices dos critérios para diferentes conjuntos	51
Tabela 3-3: Atributos dos componentes	58
Tabela 3-4: Matriz de decisão.	58
Tabela 3-5: Exemplo de matriz de decisão com índices de desempenho.....	64
Tabela 3-6: Exemplo de matriz de decisão com índices de desempenho relativos para mancais de rolamento	65
Tabela 3-7: Matriz de dependência de eixos e fixação cubo-eixo	70
Tabela 3-8 - Matriz de dependência de eixos e fixação cubo-eixo com os requisitos das interfaces.....	71
Tabela 3-9: Comparação entre diversos SE para a seleção de materiais, processos e componentes.	76
Tabela 4-1: Matriz de dependência eixos X fixação cubo-eixo.....	113
Tabela 4-2: Matriz de dependência eixos X transmissão	115
Tabela 4-3: Matriz de dependência fixação cubo-eixo X transmissão.....	116
Tabela 4-4: Matriz de dependência eixos X mancais	117
Tabela 5-1: Ranqueamento dos componentes pelo SE	131
Tabela 5-2 - Tempos gastos para o processo manual e com o uso do SE, caso 1	134
Tabela 5-3: Requisitos de aplicação da transmissão (3)	141
Tabela 5-4: Requisitos de aplicação fixação cubo-eixo 1-2	143
Tabela 5-5: Ranqueamento do componente de fixação cubo-eixo 1-2	145
Tabela 5-6: Requisitos de aplicação fixação cubo-eixo (4-5).	147
Tabela 5-7: Ranqueamento da fixação cubo-eixo (4-5) em uma barra redonda laminada.....	148
Tabela 5-8: Ranqueamento do componente de fixação cubo-eixo (4-5) em uma barra redonda trefilada h9.	152
Tabela 5-9: Ranqueamento do componente de fixação cubo-eixo (5-6) em uma barra redonda laminada.	152

Tabela 5-10: Ranqueamento do componente de fixação cubo-eixo (5-6) em uma barra redonda retificada.	153
Tabela 5-11: Requisitos de aplicação do eixo (5).....	154
Tabela 5-12: Ranqueamento do eixo (5).....	155
Tabela 5-13: Requisitos de aplicação do mancal (7).....	156
Tabela 5-14: Ranqueamento do mancal (7).....	157
Tabela 5-15: Análise do conjunto atual em relação as alternativas propostas.....	158
Tabela 5-16 - Tempos gastos para o processo manual e com o uso do SE, caso 2.....	163

LISTA DE SÍMBOLOS

D_j	avaliação do conjunto n no critério j com a diretriz j
X_{ij}	índice de desempenho do componente i no critério j
DE_j	peso da diretriz para o critério j
n	número total de componentes do conjunto
l_j	índice de desempenho do conjunto na diretriz j em relação ao conjunto de referência na diretriz j
D_j	avaliação do conjunto na diretriz j
D_R	avaliação do conjunto de referência
π	valor da preferência
w_j	peso do critério j
R_{ij}	índice de desempenho da i^{th} alternativa para o j^{th} critério
P_j	valor da função do j^{th} critério
i	componente da coluna
i'	componente da linha
j	critério a ser comparado
x_{ij}	índice de desempenho da i^{th} alternativa para o j^{th} critério
X	matriz de desempenho
$P_j()$	função preferência
$\varphi^+(i)$	índice de preferência positivo
$\varphi^-(i)$	índice de preferência negativo

$\varphi(i)$	índice de preferência
SE	sistemas especialistas
CC	custo do componente
CF	custo de fabricação da <i>feature</i>
VF	volume da <i>feature</i>
CVF	custo de usinagem por volume
CS	custo de setup
TS	tempo de setup
C2	custo do componente mais custo de fabricação de cada uma das <i>features</i>
CT	custo específico do frete
P	peso da peça
D	distância da fábrica até o fornecedor terceirizado de serviços de usinagem
C3	custo do componente mais custo de fabricação das <i>features</i> e custo logístico
ERP	Enterprise Resource Planning

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Considerações Iniciais.....	1
1.2	Motivação	3
1.3	Objetivo	4
1.4	Estrutura da Tese.....	5
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	6
2.1	Taxonomia	6
2.2	Matrizes de dependência.....	7
2.3	Metodologias DFX, diretrizes de projeto.....	8
2.4	Logística.....	10
2.5	Métodos multicritério.....	12
2.6	Interfaces.....	14
2.7	Custo de usinagem baseado em <i>features</i>	18
2.8	Sistemas Especialistas	22
2.9	Aquisição de conhecimento	23
2.10	Sistemas especialistas aplicados na seleção de componentes	24
3	MÉTODO PARA DESENVOLVIMENTO DE UM SE PARA SELEÇÃO DE COMPONENTES MECÂNICOS.....	31
3.1	Fase 1: Especificação do SE.....	32
3.1.1	Identificar as necessidades dos clientes	34

3.1.1.1	Pesquisar pelo tipo de SE a ser desenvolvido e o domínio de aplicação	34
3.1.1.2	Definir as funções a serem implementadas no SE	35
3.1.2	Estabelecer os requisitos de projeto do SE	35
3.1.3	Pesquisar e analisar os SE concorrentes.....	35
3.1.3.1	Analisar as características dos SE concorrentes.....	35
3.1.3.2	Aplicar um <i>benchmarking</i> entre os SE concorrentes.....	36
3.1.4	Estabelecer as especificações do SE	36
3.2	Fase 2: Arquitetura do método para desenvolvimento do SE	36
3.2.1	Interface de Entrada	36
3.2.1.1	Diretrizes de Projeto.....	39
3.2.1.2	Recursos de Fabricação	39
3.2.1.3	Aspectos Logísticos	40
3.2.1.4	Requisitos de Aplicação	42
3.2.2	Módulo de Seleção	42
3.2.2.1	Eliminação	43
3.2.2.2	Seleção e ranqueamento das alternativas de componentes	43
3.2.2.3	Análise de Compatibilidade das Interfaces	44
3.2.2.4	Dimensionamento de Componentes	49
3.2.2.5	Dimensionamento das interfaces de peças e componentes	49
3.2.3	Avaliação dos Conjuntos.....	49
3.2.3.1	Algoritmo de avaliação do conjunto	50
3.2.3.2	Índice de desempenho do conjunto	50
3.2.4	Interface de Saída	51
3.2.4.1	Ranking dos componentes selecionados	51
3.2.4.2	Listagem dos componentes excluídos.....	52
3.2.4.3	Descrição dos atributos e características de aplicação.....	52
3.2.4.4	Requisitos de interfaces	52
3.2.4.5	Alternativa de melhor conjunto.....	52
3.3	Fase 3: Aquisição do Conhecimento.....	53
3.3.1	Funções dos grupos de componentes implementados no SE.....	55
3.3.1.1	Definição dos grupos funcionais implementados no SE.....	55
3.3.1.2	Definir com termos padronizados cada grupo funcional e suas funções.....	55

3.3.1.3	Definir quais classes de componentes serão incluídos em cada grupo funcional	55
3.3.2	Estruturar o conhecimento das classes e tipos de componentes	56
3.3.2.1	Definir com termos padronizados cada classe e tipo de componentes	56
3.3.2.2	Definir os tipos de componentes que comporão cada classe	57
3.3.2.3	Descrição das funções de aplicação das classes	57
3.3.2.4	Descrever as funções de aplicação específicas de cada tipo de componente	57
3.3.2.5	Descrever os atributos de cada componente	58
3.3.2.6	Informações logísticas e de custos	58
3.3.2.7	Dimensionamento dos componentes e interfaces	59
3.3.3	Construção das matrizes de decisão	59
3.3.3.1	Definir os requisitos de seleção na forma de uma pergunta	60
3.3.3.2	Definição de métricas para os requisitos de aplicação	61
3.3.3.3	Índice de exclusão	63
3.3.3.4	Definir a classe de componente referência para um determinado requisito de aplicação e calcular o índice de desempenho relativo	63
3.3.4	Construir o conhecimento das interfaces dos componentes	66
3.3.4.1	Modelagem e identificação das superfícies das interfaces	67
3.3.4.2	Requisitos das interfaces	68
3.3.5	Construir o conhecimento de compatibilidade entre as interfaces	69
3.3.5.1	Definir os grupos funcionais que se acoplarão e inseri-los em uma matriz de dependência	69
3.3.5.2	Requisitos das interfaces que um grupo requer em relação a outro	70
3.4	Base de Conhecimento	73
3.5	Análise comparativa entre os diversos SE apresentados nas referências bibliográficas e o proposto neste trabalho	74
3.6	Principais inovações e contribuições do método proposto	77
4	MONTAGEM DO SE NO DOMÍNIO DE APLICAÇÃO	80
4.1	Especificação do SE	80
4.1.1	Identificar as necessidades dos clientes (nicho de mercado)	80
4.1.1.1	Definir o tipo de SE a ser desenvolvido (domínio)	80
4.1.1.2	Definir os tipos de função que SE deverá atender	81

4.1.2	Estabelecer os requisitos de projeto do SE	81
4.1.3	Pesquisar e analisar os SE concorrentes.....	82
4.1.3.1	Analisar todas as características relevantes dos SE concorrentes	83
4.1.3.2	Aplicar benchmarking nos SE concorrentes.....	83
4.1.4	Estabelecer as especificações do SE	83
4.2	Arquitetura do SE.....	83
4.2.1	Interface de entrada.....	84
4.2.2	Módulo de seleção de componentes.....	84
4.2.3	Avaliação de conjuntos	84
4.2.4	Interface de saída.....	84
4.3	Aquisição do Conhecimento.....	84
4.3.1	Definições e classes de componentes dos grupos funcionais.....	84
4.3.1.1	Definições dos grupos funcionais	85
4.3.1.2	Definição das classes de componentes pertencentes aos grupos funcionais	85
4.3.2	Estruturar o conhecimento das classes e tipos de componentes.....	85
4.3.2.1	Definir as classes de componentes.....	86
4.3.2.2	Definição dos tipos de componentes usados em cada classe.....	93
4.3.2.3	Descrever as funções de aplicação das classes de componentes	95
4.3.2.4	Descrever as funções de aplicação de cada tipo de componente	95
4.3.2.5	Descrever os atributos de cada tipo de componente.....	95
4.3.2.6	Informações logísticas e de custos	101
4.3.2.7	Dimensionamento de componentes e interfaces.....	101
4.3.3	Montagem das matrizes de decisão	102
4.3.3.1	Definir os requisitos de seleção na forma de uma pergunta	102
4.3.3.2	Se necessário definir uma métrica para um determinado requisito de seleção ..	102
4.3.3.3	Definir o índice de exclusão e a classe de componente que é a referência em atendimento de um determinado requisito de aplicação	102
4.3.3.4	Cálculo do índice de desempenho relativo	103
4.3.4	Construir o conhecimento das interfaces dos componentes	104
4.3.4.1	Modelar os componentes e identificar as superfícies que são interfaces	104
4.3.4.2	Descrever os tipos e os requisitos de cada interface	104
4.3.5	Construir o conhecimento de compatibilidade entre interfaces dos grupos de componentes.....	112

4.3.5.1	Definir dois grupos funcionais e inseri-los na matriz de dependência, um grupo nas linhas e outro nas colunas	112
4.3.5.2	Descrever os requisitos que a interface do grupo da linha requer dos componentes do grupo da coluna e vice-versa	112
5	VALIDAÇÃO DO MÉTODO	120
5.1	Aplicação do SE no cilindro gofrador de aço	120
5.2	Aplicação do SE no eixo de transmissão do desbobinador	136
6	CONCLUSÕES	166
6.1	Recomendações para trabalhos futuros	168
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	170
	ANEXO A: MÉTODO PROMETHEE II	189
	ANEXO B: CUSTOS LOGÍSTICOS	192
	ANEXO C: CUSTO DE USINAGEM BASEADO EM <i>FEATURES</i>	198
	ANEXO D: FUNÇÕES DE APLICAÇÃO DE CADA TIPO DE COMPONENTE	203
	ANEXO E: FORMUÁRIO DE CÁLCULO DO GRUPO FIXAÇÃO CUBO-EIXO E SUAS INTERFACES	210
	ANEXO F: MATRIZES DE DECISÃO	224
	ANEXO G: DESCRIÇÃO DAS FUNÇÕES DE APLICAÇÃO DAS CLASSES DE COMPONENTES	234

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Com o avanço da tecnologia, são fabricados novos produtos que podem executar não somente um número cada vez maior de funções, mas também funções cada vez mais complexas. Isto faz com que se usem mais componentes na composição do produto. Além disso, têm surgido novos componentes para satisfazer os requisitos desses novos produtos, tornando cada vez mais complexo o seu processo de seleção.

O processo de seleção de componentes padrão pode exigir mais de 20% do tempo do projetista durante o desenvolvimento de novos produtos (ULLMAN, 2003). Ademais, tem sido observado que os projetistas gastam em torno de 30% do tempo à procura de informações para o projeto. Na tentativa de reduzir esse "tempo não produtivo", os projetistas tendem a usar as informações que já possuem, obtidas de experiências anteriores (DUFFY e SIM, 2003).

Um elemento chave de qualquer abordagem para a realização de um projeto de alta qualidade e baixo custo é a utilização de componentes padrão (PAHL e BEITZ, 2007; ULRICH e EPPINGER, 2004; HARMER *et al*, 1998; CLEWS e LEONARD, 1985). Este processo de seleção de componentes padrão para satisfazer requisitos do projeto geram um número de tarefas analiticamente intensivas. Essas tarefas incluem consultas a catálogos de fornecedores e literatura técnica, por exemplo. O processo também é altamente iterativo, porque componentes padrão estão disponíveis apenas em dimensões pré-determinadas pelos seus fabricantes. O projetista deve, portanto, arbitrar entre os diferentes tamanhos disponíveis para garantir que os parâmetros críticos do projeto sejam atendidos (HICKS e CULLEY, 2004).

Entretanto, no processo de seleção, também é necessário que sejam levados em consideração os requisitos que um componente que está sendo selecionado exige para ser acoplado a outro componente. Certos componentes possuem interfaces que necessitam que processos de fabricação sejam realizados nas peças as quais se acoplará. Se na planta não houver recursos para a execução destes processos de fabricação, os mesmos deverão ser terceirizados, o que acarretará um custo logístico a ser acrescentado.

Assim, para que se possa selecionar um componente dentre várias alternativas possíveis, é necessário levar em consideração os requisitos de aplicação, o custo do componente, o custo de compatibilização da interface da peça na qual se acoplará e, quando aplicável, o custo logístico. Desta forma, uma grande quantidade de conhecimento deve ser simultaneamente considerada e manipulada, exigindo um alto nível de experiência da equipe de projeto, além de consumir muito tempo. O cenário descrito mostra-se bastante complexo, especialmente para equipes pouco experientes, o que geralmente leva a soluções pouco eficientes para os problemas de projeto (FINGUER e DIXON, 1989).

Os avanços em hardware e software tem permitido o desenvolvimento de várias ferramentas computacionais para auxiliar a atividade de projeto, bem como a criação de ferramentas para o dimensionamento e seleção de componentes (CRUL e DIEHL, 2005). A partir dos anos 80, iniciou-se a exploração das capacidades dos SE (Sistemas Especialistas) na área de projeto de produto, com ênfase na seleção de materiais e processos de fabricação (ER e DIAS, 2000).

Os SE resolvem problemas ordinariamente solucionados por um especialista humano, por isso requerem conhecimento sobre a habilidade, experiência e as heurísticas usadas pelo especialista. Outro aspecto a considerar é que o seu processo de desenvolvimento requer uma profunda interação com o especialista (REZENDE, 2003). Quando a formulação genérica de um problema a ser resolvido computacionalmente é complexa, tipicamente combinatória, e quando existe uma grande quantidade de conhecimento específico de um determinado domínio para resolvê-lo, indica-se a aplicação de SE (REZENDE, 2003).

O SE desenvolvido nesta pesquisa para a seleção de componentes com função de mancalização, transmissão de potência, fixação cubo-eixo e eixos, baseia se em uma proposta inovadora para a aquisição do conhecimento necessário para a base de conhecimento. O domínio é para a aplicação em projetos de máquinas de processamento de papel, madeira, alimentos e acabamento têxtil. Este SE, além de levar em conta os requisitos de aplicação e as diretrizes do projeto, também considera os requisitos das interfaces que os componentes a serem selecionados exigem daqueles onde irão se acoplar. Também considera os custos de fabricação e logísticos para a compatibilização dessas interfaces. O projetista também pode usar o SE para

selecionar diferentes alternativas de conjuntos que desempenham mesma função no produto, porém constituídos por diferentes componentes. Assim, se desejar, pode usar o SE para avaliar qual conjunto possui os componentes que atendem a uma determinada diretriz de projeto que se deseja priorizar.

Uma das principais etapas para o desenvolvimento de um SE é o processo de aquisição do conhecimento, que é considerado como um dos estágios mais difíceis de ser executado (BARR E FEIGENBAUM, 1981; MAHER *et al* 1984). Essa dificuldade se dá em virtude da inexistência de uma metodologia eficiente, confiável e padronizada para extração e organização do conhecimento das várias fontes de informações disponíveis. O método apresentado neste trabalho é uma alternativa que pode ser empregada para adquirir o conhecimento a fim de desenvolver um SE voltado à seleção de diferentes tipos de componentes mecânicos, que podem ser aplicados em diferentes domínios.

1.2 Motivação

Este trabalho tem como motivação as dificuldades encontradas por projetistas em várias empresas do setor de máquinas de acabamento têxtil, e também de processamento papel. Foi observado que, no processo de seleção de componentes, a maior parte do tempo gasto por projetistas é voltada a atividades que não estavam diretamente ligadas ao processo de seleção. Entretanto, essas atividades estão relacionadas a processos totalmente manuais e/ou feitos de forma empírica, que são a análise do custo de diferentes alternativas de componentes, e também da estimativa dos custos de fabricação para a compatibilização das interfaces entre os componentes, e quando aplicável os custos logísticos para esta compatibilização.

Estas análises, em quase a sua totalidade, não são do domínio do projetista e por isto demandam muito tempo, já que requerem também o auxílio do pessoal de engenharia de manufatura para calcular os custos de usinagem e eventuais custos logísticos. Ademais, o envolvimento setor de compras também pode ser exigido para o levantamento de preços das diversas alternativas de componentes. Também devem ser considerados os tempos necessários para o dimensionamento do componente e da interface da peça a qual irá se acoplar. Somente de posse de todas estas

informações, o projetista pode, de forma assertiva, fazer uma análise manual da alternativa mais viável para a aplicação.

Este processo de análise da melhor alternativa de componente é longo e se repete várias vezes durante o projeto de uma máquina, consumindo, assim, muito tempo que poderia ser utilizado no desenvolvimento de princípios de solução para o projeto. Em função destas limitações, o autor propõe, neste trabalho de tese, o desenvolvimento da base de conhecimento de um SE que auxilie o projetista neste processo de seleção. Face a necessidade de conhecimento para que este SE possa operar, também é proposto o método para a aquisição deste conhecimento.

1.3 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo criar um método para o desenvolvimento da base de conhecimento de um SE para a seleção de componentes mecânicos usado nas fases de projeto preliminar e detalhado que: deverá ranquear as alternativas possíveis com base nos requisitos de aplicação, nos custos do componente, na estimativa de custo de compatibilização das interfaces das peças nas quais este componente se acoplará e, quando aplicável, nos custos logísticos necessários ao processo de compatibilização dessas interfaces. Também poderá dimensionar os componentes e as interfaces para que possam se acoplar. Além disso, este SE deverá ranquear diferentes alternativas de conjuntos formados pelos componentes selecionados de acordo com uma ou mais diretrizes.

O SE integra técnicas como um método multicritério para ranquear as alternativas possíveis de serem usadas. Para tanto, são utilizados algoritmos para dimensionamento dos componentes e suas interfaces. A estimativa de custo de fabricação para compatibilização de interfaces é feita multiplicando o volume de cada *feature* pelo seu custo por volume. Os custos logísticos para essas usinagens são estimados pelo uso de tabelas de custo do frete. A construção da base de dados faz uso da taxonomia para padronizar os termos e conceituar os componentes, matrizes de decisão e de dependência para a aquisição do conhecimento dos componentes e da compatibilidade de suas interfaces. Estes conhecimentos são transformados em regras para que o SE possa selecionar os componentes.

1.4 Estrutura da Tese

O presente capítulo traz uma introdução que expõe a justificativa do método para o desenvolvimento da base de conhecimento de um SE voltado à seleção de componentes mecânicos e de um método estruturado para a aquisição do conhecimento necessário à constituição deste SE. Além disso, apresenta o objetivo do trabalho, sua motivação e sua estrutura.

No capítulo 2, são abordados os conceitos de taxonomia, matrizes de dependência, metodologias DFX, logística, métodos multicritério, interfaces e custo de usinagem baseado em *features*, sistemas especialistas, aquisição de conhecimento e uma revisão bibliográfica do estado da arte em SE aplicados na seleção de componentes mecânicos.

O capítulo 3 apresenta o método para o desenvolvimento da base de conhecimento do SE para a seleção de componentes e o método proposto para aquisição deste conhecimento, utilizando os conceitos abordados nos capítulos anteriores, de forma a cumprir com o objetivo definido no Capítulo 1.

O capítulo 4 apresenta a montagem do método, visto no capítulo 3, para o projeto de máquinas de processamento de papel, alimentos, madeira e acabamento têxtil, construindo o SE e sua base de dados para operar nos domínios supracitados.

O capítulo 5 aborda a validação do SE desenvolvido pelo método em dois casos reais da indústria de processamento de papel, comparando as seleções dos componentes do projeto feito de forma manual por um projetista com as seleções feitas com o uso do SE proposto. Estes resultados são analisados de forma a verificar a eficiência do SE.

O capítulo 6 apresenta as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

O capítulo 7 apresenta as referências bibliográficas utilizadas para a realização deste trabalho de pesquisa.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Este capítulo tem por objetivo apresentar os fundamentos teóricos de ferramentas e técnicas a serem utilizados para a elaboração do método proposto no capítulo 4.

2.1 Taxonomia

Segundo Dieter (2009), estima-se que em 2020 a soma de todo o conhecimento acumulado irá dobrar a cada 73 dias. Esta enorme quantidade de informações auxilia a geração de novos conhecimentos, mas deste processo também faz parte o que já é conhecido. Este crescimento gigantesco do volume de informações também torna mais difícil a sua busca e recuperação. Como resultado, o maior desafio não são as informações em si, mas a forma e a capacidade de acessar a informação e como recuperar aquela que é relevante. Neste contexto, a taxonomia tem sido muito utilizada para padronizar as terminologias, possibilitando, assim, a recuperação das informações desejadas de forma mais objetiva e rápida.

As taxonomias são definidas como “elementos estruturantes, estratégicos e centrais para negócios baseados em informação e conhecimento. Para classificar e facilitar o acesso à informação, taxonomia, em um sentido amplo, é a criação da estrutura (ordem) e dos rótulos (nomes) que ajudam a localizar a informação relevante (VITAL e CAFÉ, 2011).

A motivação para o uso da taxonomia é a padronização da terminologia. Um grande problema na coordenação de grandes projetos é a diversidade de origens dos engenheiros e o fato de usarem diferentes tipos de termos para o mesmo objeto. Além disso, muitos engenheiros utilizam a mesma terminologia, só que de muitas maneiras diferentes e com muitas conotações diferentes. Por causa destas diferenças, a informação que um engenheiro pretende transmitir para outro pode não ser entendida corretamente, gerando falhas de comunicação, perda de tempo e de recursos, ARMSTRONG (2012).

Outros motivos para o uso da taxonomia são a representação de conteúdos para a recuperação de informações na internet, web-semântica, e educação, entre outras. (VITAL e CAFÉ, 2011).

Neste trabalho as taxonomias são usadas para a padronização dos termos técnicos dos componentes, das classes e grupos funcionais. Também auxilia na estruturação da base de dados, as definições, as características e atributos dos componentes.

2.2 Matrizes de dependência.

As matrizes de dependência também conhecidas como DSM (*Design Structure Matrix, ou Dependency Structure Matrix*), (WECK, 2012). Segundo Danilovic e Browning (2007), uma DSM é uma matriz que representa os elementos de um sistema. Por exemplo, os elementos da linha podem ser os componentes de um grupo funcional e os da coluna de outro grupo. As células são as interações entre os elementos das colunas e das linhas. Por exemplo, a DSM mostrada na Figura 2-1 mostra as influências dos elementos B e C sobre o elemento A.

Figura 2-1: Exemplo de uma DSM

	A	B	C	D
A	A	1	1	
B		B	1	
C	1		C	1
D			1	D

Fonte: Danilovic e Browning, 2007.

Para a TANG *et al* (2010), DSM é um método estruturado que representa e analisa as relações de interação entre os elementos do sistema, sendo considerado um meio adequado para capturar e gerenciar o conhecimento de projeto em nível de sistema. Para capturar o conhecimento de projeto por trás das interações no DSM, é necessário entender o comportamento básico ou características de tais interações.

Uma grande vantagem da representação do DSM sobre as outras ferramentas reside na sua capacidade de fornecer um mapeamento sistemático entre os elementos que a torna fácil de ler, independentemente do seu tamanho, além de ser muito compacta. Ela representa claramente onde ocorre a interdependência. O DSM oferece uma melhor metodologia de planejamento ou estrutura para as decisões gerenciais (Maheswari e Varghese, 2005).

O DSM é uma ferramenta muito flexível, que tem sido utilizada para modelar diversos tipos de sistemas, e dependendo do tipo pode representar vários tipos de arquitetura. Por exemplo, no modelo da arquitetura de um produto, os elementos poderiam ser os componentes do produto e as interações as interfaces ou influências entre os componentes. Para a arquitetura de uma empresa, os elementos do DSM poderiam ser as pessoas ou equipes e as interações as comunicações entre estas pessoas ou equipes. Para a arquitetura de um modelo de processo, os elementos do DSM poderiam ser as atividades no processo e as interações as os fluxos de informação e/ou materiais (EPPINGER e BROWNING, 2012).

Neste SE o DSM é usado para a montagem das matrizes de dependência de forma a representar os requisitos das interfaces que um componente requer do outro no qual está sendo montado. O tamanho da matriz depende da quantidade de combinações possíveis dos componentes que podem ser montados entre si, pertencentes a dois grupos funcionais.

2.3 Metodologias DFX, diretrizes de projeto

Diretrizes são definidas como orientações, guias, rumos ou linhas que definem e regulam um traçado ou um caminho a seguir. São instruções ou indicações para se estabelecer um plano, uma ação, um negócio (Significados, 2015).

As metodologias DFX surgiram no início dos anos 60, com os estudos do pesquisador Boothroyd e sua equipe, inicialmente com as disciplinas *Design for Manufacturing* (DFM), ou projeto para fabricação, e *Design for Assembly* (DFA), ou projeto para montagem. Em seu livro, foram desenvolvidas várias diretrizes específicas para cada processo de fabricação, por exemplo: projeto para conformação a quente, para soldagem, para fundição em areia, para injeção de plásticos, etc., cobrindo praticamente todos os tipos de processos de fabricação de peças (ASHBY 2009).

A partir do início dos anos 80, baseado nos estudos de Boothroyd and Dewhurst, foram desenvolvidas centenas de abordagens abrangendo vários temas, através de várias disciplinas. Esta complexidade torna difícil para pesquisadores e profissionais acompanharem os desenvolvimentos em DFX (ANDERSSON, 2014). Além disso, algumas das pesquisas cobrem ideias semelhantes, mas com nomes diferentes, e até

mesmo técnicas com o mesmo nome muitas vezes assumem significados, abordagens e orientações diferentes. Em função do acima exposto e para evitar erros de nomenclatura e definições, foi desenvolvido um estudo para padronizar a taxonomia das abordagens DFX (ARNETTE *et al*, 2014).

O desenvolvimento das metodologias DFX, onde o X significa a diretriz que se deseja focar, possui várias diretrizes como: DFM, DFA, DFC (*Design for Cost* ou projeto para o custo), entre outras. DFM significa projeto para maior facilidade de fabricação do conjunto de peças que formam o produto. DFA é uma diretriz de projeto de produto para a facilidade de montagem. Assim, projeto para fabricação e montagem (DFMA), é uma combinação de DFA e DFM (BOOTHROYD *et al* 2002).

O DFM, também conhecido como Engenharia Simultânea, é o desenvolvimento concomitante das funções do projeto do produto e processo, que visa reduzir custos e tempo para lançar o produto no mercado. Como resultado da aplicação desta técnica é possível obter um produto de qualidade que pode ser introduzido, considerando-se a otimização do processo produtivo, uma vez que leva em conta todo o sistema de produção durante o desenvolvimento deste projeto, (KRUMENAUER *et al*, 2008).

No início dos anos 80, a pressão por mais competitividade e a necessidade pela diminuição do ciclo de desenvolvimento de produtos fez com que os projetos fossem desenvolvidos por várias equipes simultaneamente, que podem estar localizadas no mesmo local, em departamentos diferentes, ou até mesmo em países diferentes. Esta abordagem é conhecida como engenharia simultânea, (DIETER e SCHMIDT, 2009).

Assim, quando um projeto é desenvolvido por uma ou várias equipes, estas precisam ter as mesmas diretrizes de forma que o projeto possa ser desenvolvido de maneira coerente, e que todas as partes do projeto possam atender os mesmos requisitos dos clientes. Além disto, as diretrizes podem ser usadas estrategicamente pelos projetistas para compensar uma deficiência ou falta de recurso da empresa. Por exemplo, se a empresa não tem uma fresadora, os projetistas podem usar as diretrizes DFM de forma que os projetos usem componentes que não exijam este processo de fabricação nas peças onde serão montados.

As diretrizes de projeto são usadas na interface de entrada para que o projetista possa informar ao SE qual a prioridade que deve ser dada no processo de seleção dos componentes. Neste trabalho são consideradas três diretrizes, DFC, DFA e DFM.

2.4 Logística

A palavra logística vem de um termo militar de origem francesa *logistique*, que a define como a aplicação prática da arte de mover exércitos, compreendendo os meios e arranjos que permitem aplicar os planos militares estratégicos e táticos (TIXIER *et al*, 1983). A partir da década de 50, a logística começou a ganhar maior importância no ambiente empresarial, motivada por fatores como: alteração nos padrões e demanda dos consumidores, avanço da (TI) tecnologia da informação, influência da logística militar, etc. (BALLOU, 2001).

Em 1999, o *Council of Logistics Management* (CLM) definiu a logística como “a parte do processo de gestão da cadeia de suprimentos que trata do planejamento, implementação e controle eficiente e eficaz do fluxo e armazenagem de bens, serviços e informações relacionados, do seu ponto de origem até o seu ponto de consumo, de maneira a satisfazer plenamente a necessidade dos clientes”

A logística mais conhecida é aquela usada pelos fabricantes de produtos para transportar a matéria prima até os parques industriais ou sua produção final até os mercados consumidores. Porém, as indústrias têm enfrentado pressões significativas para implementar práticas ecologicamente eficientes em sua cadeia de abastecimento devido às restrições de recursos naturais e crescente consciência ecológica entre os clientes.

Os custos logísticos compreendem uma proporção significativa dos custos totais das empresas, dependendo do método aplicado para a sua mensuração e o tipo de indústria em questão, esta proporção em empresas das economias desenvolvidas pode chegar a 10 por cento da receita (ENGBLOM *et al*, 2012). Assim sendo, é necessário que as empresas melhorem a eficiência logística de forma a atenuar esta parcela de seus custos. As empresas que integram apenas seus processos internos não são eficientes o suficiente, então cabe a elas a busca da integração com os membros da cadeia de suprimentos (FOLZ e CARVALHO, 2014).

O custo logístico de um produto começa a ser definido nas etapas de projeto, pois depende das decisões e do tipo de componente selecionado para compor o produto. Estas decisões são de natureza estratégica e operacional, e muitas dessas decisões são limitadas, pelas características do produto, tais como o número e a complexidade dos componentes, o quão comum são os componentes ou modularidade deste produto. As empresas também têm adotado técnicas de manufatura enxuta com o objetivo de diminuir as atividades que não agregam valor ao produto, como o transporte (UGARTE *et al* 2016). Além disto, a logística impacta diretamente no prazo de entrega, pois este depende dos fornecedores, se possuem estoque para pronta entrega e se a logística do transporte não é muito complexa. Componentes importados podem estar sujeitos a uma cadeia logística longa, incluindo os aspectos aduaneiros para o desembaraço dos componentes na receita federal.

Com o advento do uso de sistemas de gerenciamento do tipo ERP (Enterprise Resource Planning) nas empresas, tem sido possível o cálculo dos custos logísticos, por meio de um módulo presente nos ERPs, conhecido como TMS (*Transportation Management System*), que opera de forma análoga a um *plug in*. O TMS pode ser ativado na maioria dos sistemas de ERP e poderá fornecer os custos logísticos de forma precisa para as diversas operações que compõem este processo, como os módulos TMS das empresas Totvs e Sap, por exemplo (TOTVS 2015, SAP 2015).

Outra possibilidade para o levantamento dos custos logísticos é o uso de softwares dedicados, como o GKOfrete (2015), que possui uma interface projetada para integrar-se a outros softwares, como o ERP (para definição da melhor rota com o cálculo de tempos e custos de pedágio), o software da secretaria da fazenda (para apurar os impostos), etc. Esta é uma solução completa que calcula todos os custos envolvidos nas operações logísticas.

Segundo ARAÚJO *et al* (2014), foram desenvolvidas várias planilhas com o objetivo de levantar o custo logístico. Neste trabalho será usada a planilha do Manual da NTC, que em 1990 foi desenvolvida pela Associação Nacional de Transporte de Carga (NTC) e a Fundação Instituto de Pesquisa Econômica (FIPE). É composta por todos os índices das operações de transporte, acrescidos dos índices da variação do custo de coleta e entrega de mercadorias. Este instrumento é adotado como referência para grande parte das empresas e cooperativas de transporte cargas no

Brasil e é o que apresenta a maior quantidade de variáveis de análise. Esta é a única metodologia, dentre as apresentadas, que considera todas as despesas indiretas envolvidas no processo de transporte de cargas, servindo como referência para a maioria das empresas de transporte nos seus planejamentos operacionais e nos processos de tomada de decisão. Esta metodologia será usada neste trabalho para estimar o custo logístico quando necessário para compatibilizar as interfaces das peças e é detalhada no ANEXO B: CUSTOS LOGÍSTICOS.

2.5 Métodos multicritério

Os métodos multicritério de tomada de decisão conhecidos pela sigla MCDM *multi-criteria decision-making*, surgiram nas décadas de 70 e 80, em substituição aos modelos ortodoxos de pesquisa operacional, que começaram a ser desenvolvidos na década de 50, para a resolução de problemas logístico-militares nas forças armadas durante a 2ª Guerra Mundial, que buscavam soluções para problemas gerenciais complexos (MARINS e COZENDEY, 2005).

A abordagem multicritério de apoio à decisão pode ser caracterizada como um conjunto de métodos que buscam tornar claro um problema, no qual as alternativas são avaliadas por múltiplos critérios, os quais na maioria dos casos são conflitantes. Decidir é posicionar-se em relação ao futuro, assim a decisão pode ser definida como “o processo de colher informações, atribuir importância a elas, posteriormente buscar possíveis alternativas de solução e, depois, fazer a escolha entre as alternativas” (GOMES et al, 2002).

Segundo Souza (2002), uma boa decisão é uma consequência lógica daquilo que se quer, daquilo que se sabe e daquilo que se pode fazer, assim:

- **O que se quer:** se refere às preferências que se têm pelas diversas consequências das decisões. Tais consequências podem ser incertas ou distribuídas ao longo do tempo.
- **O que se sabe:** é o conhecimento em relação às grandezas envolvidas no processo e das relações entre elas; a informação advinda do processo de decisão; a percepção das circunstâncias e das leis que a afetam.
- **O que se pode fazer:** são as alternativas disponíveis e possíveis de ação.

Existem vários métodos desenvolvidos para a abordagem e tratamento de problemas com múltiplos critérios. Destacam-se dois grupos representativos de escolas citados na literatura (ALMEIDA e COSTA, 2003):

- **Escola americana:** destaca-se a teoria multiatributo MAUT, TODIM entre outros.
- **Escola europeia:** destacam-se os métodos de sobre classificação, em especial os da família ELECTRE, PROMETHEE, entre outros.

Outras abordagens ou métodos são apresentados na literatura, como: programação matemática multiobjetivo, SMART, MACHBETH, entre outras (ALMEIDA E COSTA, 2003).

A escolha do método ideal depende de vários fatores, como: o problema analisado, o contexto considerado, a estrutura de preferências do decisor e a problemática em si (ALMEIDA e COSTA, 2003).

O método PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations*) foi desenvolvido e apresentado por (BRANS, 1982). O método PROMETHEE I oferece um ranqueamento parcial das alternativas e o PROMETHEE II desenvolve um ranking completo de todas as alternativas. Este método é utilizado para o apoio na tomada de decisão e consiste em construir uma relação de sobre classificação valorada (SILVA, 2008). Outras variações do método foram desenvolvidas para usos mais específicos e complexos. O método se baseia em critérios generalizados e comparações par-a-par, a fim de construir uma relação de ranking entre as alternativas. É muito utilizado quando os critérios considerados são de diversas áreas do conhecimento e de difícil quantificação e comparação (BRAINS *et al.* 1986).

Para o ranqueamento das alternativas, são utilizadas funções de preferências escolhidas pelo decisor. Essas funções definem graus de indiferença e de preferências entre duas alternativas baseadas na diferença entre o desempenho nos critérios. O método PROMETHEE não precisa de procedimentos de normalização dos pesos, evitando, dessa forma, problemas e erros que aparecem em muitos métodos MCDM. Esses métodos envolvem processos de normalização para transformar dados

de classificações de desempenho com diferentes unidades de medidas que estão em uma matriz em unidades compatíveis, e diferentes métodos de normalização podem resultar em diferentes decisões.

O método PROMETHEE II, que será utilizado neste trabalho para fazer o ranqueamento das melhores alternativas em função dos requisitos de aplicação, é visto em mais detalhes no ANEXO A: MÉTODO PROMETHEE II. Suas principais características são a simplicidade, clareza e estabilidade. É usado para fazer um ranqueamento inicial das alternativas de componentes em função dos requisitos de aplicação e dos pesos obtidos das matrizes de decisão.

2.6 Interfaces

As interfaces são definidas por Scalice *et al* (2011) como sendo a fronteira entre os módulos que compõem o produto, bem como as interações existentes entre o meio-ambiente em que o produto está inserido com seus possíveis usuários. Neste trabalho, como a abordagem é entre componentes e peças, a interface corresponde à fronteira entre estes.

Para Hillström (1994), as interfaces são superfícies funcionais que têm a finalidade de unir dois ou mais módulos e podem ser definidas como as superfícies que realizam ao menos uma das seguintes funções: providenciar suporte, transmitir força, localizar o componente na montagem, providenciar a localização para outros componentes na montagem e transmitir movimento. Miller e Elgard (1998) diferenciam interfaces e interações. Para os autores, interfaces são as fronteiras entre os módulos, enquanto que as interações descrevem as relações de entrada e saída entre os módulos, as quais precisam ser compatíveis.

A partir dessas definições, pode-se constatar que há um senso comum, também compartilhado por Pimmler e Eppinger (1994), de que uma interface é uma região onde há um fluxo de energia, material, informação ou uma interação espacial entre dois módulos ou componentes, ao menos.

Fixson (2005) aponta a complexidade das interfaces como um elemento crítico para a viabilidade de reuso de componentes e recomenda a simplificação da mesma. Para ilustrar a importância de tais ações de redução de complexidade, o autor cita o

exemplo das interfaces de componentes eletroeletrônicos, que consistem em sua grande maioria de conexões tipo encaixe, fáceis de montar e que não apresentam possibilidade de erro. Além disso, para que sejam garantidos o intercâmbio e a separação entre módulos, suas interfaces devem ser adequadamente planejadas. De forma análoga, em relação aos componentes, devem ser cuidadosamente selecionados aqueles que possuem interfaces que evitam e ou gerem processos de fabricação complexos e que sejam de fácil montagem e desmontagem nas peças as quais se acoplam.

O uso de interfaces simples e no menor número possível também é um dos objetivos apontados por Neugebauer *et al* (2007) para o desenvolvimento de unidades modulares autônomas em produtos mecatrônicos, permitindo a substituição rápida de módulos quando necessário. Wiendahl *et al* (2007) apontam que a utilização de interfaces uniformes facilita a compatibilidade de um sistema de manufatura flexível ou modificável, pois permite separar ou integrar diferentes elementos de fabricação.

O uso de interfaces padronizadas tem grande influência em diversos aspectos de um produto como: a) Montagem – pela padronização das interfaces entre os módulos, reduzem-se o número de operações para preparação da interface, os tempos e os custos de fabricação e montagem; b) Processo – a padronização dos módulos provoca uma redução na variedade de processos, aumento do número de itens similares e redução nos custos de produção; c) Atualização - os módulos e componentes com funções específicas podem ser substituídos por outros mais atualizados e/ou com maior desempenho sem alterações nos outros componentes do produto; d) Fim de vida – a fácil desmontabilidade, padronização e intercambiabilidade tornam o produto mais propenso à reutilização de componentes.

Estas características tornam o produto muito atrativo para a indústria, isto é evidenciado por vários autores que apresentam diversos estudos sobre as interfaces de produtos modulares, como (HÖLTTÄ e OTTO, 2005; VAN WIE *et al.*, 2003; PEREIRA *et al*, 2005). Essa ênfase ocorre porque, para Ullman (2003), a complexidade ocorre nas interfaces. Assim por este ponto de vista, Hölttä e Otto (2005) utilizam a complexidade das interfaces como medida de flexibilidade do produto. Isto ocorre porque é difícil reprojeter um produto sem interferir nas suas interfaces, o que implica dizer que quanto mais desacoplado um produto, mais flexível

ele se torna. Este raciocínio pode ser aplicado nas interfaces dos componentes, pois quanto menor a quantidade de requisitos das interfaces que os componentes geram nas peças as quais irão se acoplar menores serão os custos de fabricação e montagem, e também de desmontagem e manutenção.

Para Ullman (2003) é de fundamental importância considerar as interfaces para o projeto quando se desenvolve um conceito de um produto, porque as conexões ou interfaces suportam as funções entre componentes e determinam sua posição relativa e sua localização. De acordo com Whitney (2004), a modularização, em muitas aplicações, é possibilitada pela padronização das interfaces, pois esta padronização está intimamente ligada ao desacoplamento funcional. Este desacoplamento acaba por auxiliar na redução da ocorrência de efeitos incidentais. Para o autor, a padronização das interfaces surge quando:

- As interfaces não são submetidas a grandes cargas de trabalho ou de tensão;
- Elas não desempenham uma função principal ou afetam o desempenho do produto;
- Não consomem muitos recursos do projeto, como espaço, por exemplo;
- É necessária economia de escala para sua manufatura;
- Elas podem ser definidas e projetadas independentemente dos itens unidos por elas.

Segundo Ullman (2003), as restrições do produto são os muros ou o envelope para o produto. Portanto, o projetista deve iniciar com o conhecimento sobre as interfaces com outros objetos, pois muitos produtos devem trabalhar com outros objetos existentes e imutáveis. Assim, para a determinação das interfaces do produto, deve se considerar todos os aspectos do ciclo de vida do produto. Isso se deve ao fato de que se está trabalhando com elementos que unem diferentes componentes e que interferem diretamente nos processos de manufatura, montagem, uso e reciclagem.

Outro aspecto importante a ser enfatizado em relação às interfaces refere-se à “localização”, que são as medidas dos componentes relativas à posição que ocupam no espaço. O segundo aspecto é a “orientação” dos componentes que se refere ao relacionamento angular entre os mesmos. Blanding (1999) cita que as conexões determinam diretamente os graus de liberdade (*DOF – degrees of freedom*) entre os

componentes e que cada interface deve ser pensada como restringindo algum ou todos esses graus de possibilidade de liberdade. Toda conexão entre dois componentes tem seis graus de liberdade – três translações e três rotações. É o projeto das conexões que determina quantos *DOF* o produto final terá.

A modularidade e interfaces padronizadas aumentam a taxa de introdução de inovações incrementais (CABIGIOSU *et al*, 2013). Isto ocorre porque produtos modulares são concebidos pela soma dos módulos unidos por interfaces padronizadas. Assim sendo, quando se faz necessária uma atualização, ou *upgrade*, de um módulo com funções específicas, esta pode ser feita pela substituição por outros mais atualizados sem alterações nos outros componentes do produto. Outro aspecto do uso de interfaces padrão é a possibilidade de desenvolvimento de um produto por diferentes empresas e/ou grupos de forma simultânea. Isto poupa tempo e reduz a necessidade de ferramentas de integração. Além disso, permite que as empresas trabalhem de forma autônoma, reduzindo, assim, os custos de desenvolvimento de novos produtos, além de reduzir o intercâmbio de informações necessário para projetar um componente que se encaixa no projeto geral do produto. A ênfase pela padronização das interfaces também é abordada por (KRAUSE e EILMUS 2011).

Para Cabigiosu *et al* (2013), as interfaces podem ser classificadas em três padrões. O primeiro é o padrão aberto, ou seja, que adota os protocolos de comunicação entre os componentes amplamente difundidos dentro de um determinado setor. O segundo é o padrão fechado, isto é, uma empresa projeta protocolos de comunicação entre componentes que, embora específicos representam requisitos da norma que são replicados em todos os produtos e projetos dentro de uma empresa específica. E o terceiro são as interfaces estáveis ou mutáveis ao longo do tempo (isto é, ao longo do intervalo de tempo do processo de desenvolvimento). As interfaces são estáveis quando bem definidas antecipadamente, no início do desenvolvimento do projeto, e podem ser de padrão aberto ou fechado.

Segundo Chen e Liu (2005) as interfaces podem ser de dois tipos principais. As interfaces internas coordenam os elementos funcionais para executar todas as funções de produto. Um exemplo disto é a interface entre o notebook e sua tela. As interfaces externas, por sua vez, ligam produtos externos, ou seja, produtos

complementares ou usuários, e pode ser exemplificada como a interface de um monitor e um desktop.

Zheng, *et al* (2016) classificou as interfaces em 4 tipos principais com os tipos de transferências que ocorrem nelas:

- **Interface geométrica:** indica como um elemento é fisicamente ligado a outro, e está relacionada principalmente à geometria da interface definida no produto à base de *features* no modelo CAD;
- **Interface de energia:** indica como a energia (energia elétrica, mecânica entre outras) é transferida entre os componentes;
- **Interface de controle:** indica a forma como um elemento irá ser controlado pelos outros, é principalmente relacionado à disciplina de eletrônica de sistemas mecatrônicos;
- **Interface de dados:** indica como a informação e a comunicação são transferidos entre os componentes, e está relacionada principalmente a softwares de sistemas mecatrônicos.

As interfaces neste trabalho são usadas para definir a fronteira entre dois componentes. Quando dois componentes precisam ser montados entre si, um deles requer que o outro tenha uma interface compatível para que possam se acoplar. Porém, em muitos casos a peça onde o componente será montado tem uma interface parcialmente compatível, requerendo uma ou mais *features* para a sua compatibilização. Estas *features* tem requisitos para os seus processos de fabricação, e estão definidas na matriz de dependência. Assim é possível estimar o custo de compatibilização das interfaces conhecendo o processo de fabricação de cada *feature* com seus requisitos, em função do material, tamanho da peça e do volume a ser usinado em cada *feature*.

2.7 Custo de usinagem baseado em *features*

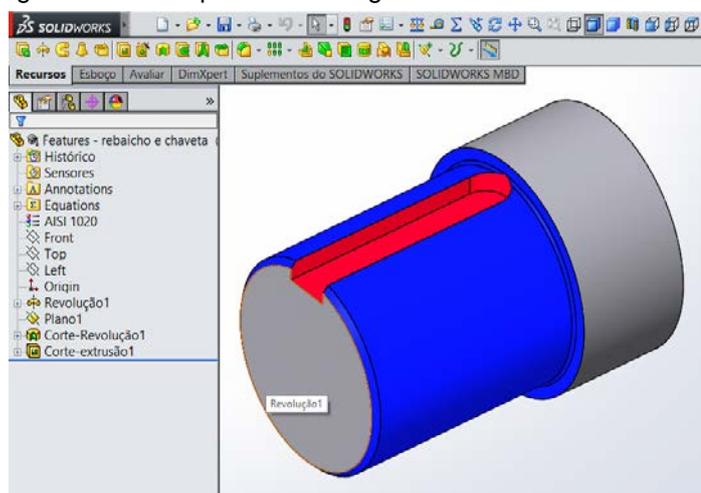
As *features* foram introduzidas no final dos anos 70 como elementos de modelagem em sistemas CAx (CAD, CAE, CAM, CAPP), a fim de representar os dados quantitativos e qualitativos relevantes para fins de desenvolvimento de produtos. Neste sentido, modelagem por *features* representa uma evolução de representação geométrica baseada em computador, e é hoje a abordagem

predominante para modelagem de produto. Atualmente, sistemas CAx baseados em *features* são considerados o estado da arte em tecnologias de modelagem de produto. No início, o objetivo das *features* era a modelagem repetitiva de componentes similares através do desenvolvimento de bibliotecas de elementos pré-definidos em softwares CAD. Além disto, foram utilizadas para organizar os programas CNC de peças no computador. (SANFILIPPO e BORGIO 2016).

Uma *feature* pode ser definida como portadora de informações de alto nível semântico e uma unidade básica de transmissão. Esta definição possui diferentes significados em contextos diferentes, dependendo do domínio específico (PENG *et al* 2016). Também pode ser definida por diversos pontos de vista como projeto, análise, montagem, ou diversas funções relativas à manufatura. São também usadas para dar um significado ao produto com relação aos seus atributos e sua geometria, além de melhorar a comunicação entre o projeto e a fabricação (PONTES e PORTO 2013).

Através das *features*, pode-se compor uma estrutura de dados para representar uma peça ou uma montagem em termos dos seus constituintes, onde cada *feature* tem uma identidade única; que pode ser expressa em termos de: parâmetros dimensionais, geométricos, entidades topológicas, e etapas de construção para produzir uma geometria. Ou seja, a modelagem computacional de uma peça pode ser composta de várias *features*. A Figura 2-2 mostra um exemplo de modelagem baseada em *features*.

Figura 2-2: Exemplo de modelagem baseada em *features*



Fonte: Própria

No lado esquerdo pode se notar 4 *features*, a de revolução 1 representada pela cor cinza na peça, um plano 1 para posicionar a chaveta, o corte-revolução 1 do rebaixo em azul, e o corte extrusão 1 do rasgo da chaveta em vermelho.

Para transformar uma peça bruta em uma peça acabada são necessários processos de fabricação que podem ser definidos a partir de informações contidas na peça. Esse conjunto de informações pode ser armazenado no projeto da peça em forma de *features*. Bhandarkar *et al* (2000) afirmam que as *features* permitiram o sucesso na ligação entre os sistemas CAD/CAM, e foi um passo fundamental para a automatização do desenvolvimento do produto desde o estágio de projeto até à manufatura.

Features de manufatura são características geométricas extraídas do sistema CAD e que podem ser fabricadas com recursos disponíveis, como máquinas e ferramentas. São definidas como um volume que é retirado na operação de manufatura, esse volume corresponde ao material que é removido na operação de usinagem. As *features* de manufatura são mapeadas a partir das *features* de projeto disponíveis no banco de dados, através da decomposição volumétrica baseada em critérios geométricos, *setup* da peça e nas operações de fabricação.

Ao longo dos anos foram desenvolvidas várias aplicações com *features* com o objetivo de automatizar a interface entre CAD e CAM, e com isso conseguir a total integração do projeto com o processo produtivo. Um dos objetivos foi o desenvolvimento de técnicas e ferramentas para estimar o custo de fabricação baseado em *features*. Isto permitiu aos projetistas saber antecipadamente o custo de uma peça e, a partir disto, poder analisar e comparar diferentes soluções de forma que possam selecionar aquela que, do ponto de vista de custo e qualidade, seja a mais vantajosa. Assim, a possibilidade de prever o custo de produção das peças de um produto é essencial para o seu sucesso comercial, pois permite que sejam feitas escolhas e tomadas decisões na fase de projeto que implementam a qualidade e o custo (MOLCHO *et al* 2014).

Na fase de detalhamento do projeto, quando estão sendo selecionados os componentes que farão parte do produto, o projetista precisa acoplar componentes e peças uns nos outros, de maneira que formem conjuntos para desempenhar uma

função específica. Porém, quando os componentes se acoplam, exigem que as interfaces tenham certas características de dimensão, rugosidade ou geometria. Tais características são definidas por uma ou mais *features* que tornam a interface compatível. O projetista normalmente dispõe de várias opções de componentes para uma função, porém alguns se acoplam aos outros sem a necessidade de um processo de fabricação que torna a interface compatível como uma *feature* de rebaixo ou um canal de chaveta. Assim, se o objetivo é uma redução de custo, o projetista precisa, no processo de seleção do componente, saber o que é mais viável, se um componente mais caro e que não gere processos de fabricação como usinagens de *features* ou um mais barato, que precisa de usinagem para compatibilizar as interfaces. É neste ponto que a estimativa de custo de usinagem por *features* tem uma grande importância, pois pode ser feita a comparação apenas do custo de um componente com outro que além de seu custo agrega o de usinagem.

Para Narita (2013) o custo de usinagem é o fator mais importante para a fabricação de um produto, tendo influência no custo do mesmo. Neste contexto, as tolerâncias empregadas na fabricação geram custos de produção de acordo com a precisão requerida. Por exemplo, uma usinagem com precisão de $\pm 0,1\text{mm}$ é de 2 a 3 vezes mais barata que uma usinagem com precisão de $\pm 0,01\text{mm}$. Assim é de suma importância que o projetista use apenas a precisão suficiente para garantir a qualidade e a funcionalidade no produto.

A definição da precisão da tolerância dimensional também depende do tipo de componente que o projetista irá selecionar, por exemplo, se usar uma chaveta para fixar uma polia em um eixo este irá precisar de uma tolerância na usinagem radial no mínimo k7, porém se for usado um anel de fixação o mesmo poderá ser fixado em um eixo com tolerância h9 cuja obtenção é em torno de 2 vezes mais barata, além de não necessitar a usinagem da *feature* do canal de chaveta. Com isso, pode-se observar que a seleção do componente influencia diretamente nos custos de produção.

As tolerâncias são definidas logo que os requisitos geométricos são conhecidos e especificados. Esta definição não é só a especificação das tolerâncias da peça, mas também envolve a decisão sobre o projeto e a especificação das tolerâncias do processo, além da definição de sequências de montagem (SCHLEICH e WARTZACK 2014).

Para Pontes e Porto (2013) os sistemas para simulação de manufatura utilizam mais comumente como referência o volume das *features*, pois as peças são compostas de *features* que são características geométricas que dão forma a elas. Cada *feature* possui um volume e uma área que são utilizados como base para os cálculos de tempos e custos de fabricação da peça. O volume da *feature* é utilizado como base para o cálculo do tempo de desbaste e a área da *feature* como base para o tempo de acabamento. Os custos são calculados baseados nos tempos de processamento de cada *feature*.

Neste trabalho a estimativa de custo de compatibilização das interfaces é feita por meio do volume de remoção de cada *feature* em (mm^3) multiplicado pelo custo específico de usinagem de cada tipo de *feature* ($\text{R\$/mm}^3$), e quando aplicável adicionado do custo de *setup* para usinar a *feature*. Isto é usado para o ranqueamento final da melhor alternativa considerando, além do custo do componente, também o custo de fabricação necessário para compatibilizar as interfaces. A formulação dos volumes e áreas das *features* e a forma de estimar o custo de usinagem das mesmas é apresentado no ANEXO C: CUSTO DE USINAGEM BASEADO EM *FEATURES*.

2.8 Sistemas Especialistas

Os SE são um ramo aplicado da IA (inteligência artificial), e foram desenvolvidos em meados dos anos 1960 (LIAO, 2005). Tem o objetivo de solucionar problemas de forma rápida, inteligente e reproduzir decisões de um especialista humano numa determinada área de interesse.

Feigenbaum *et al* (1971), definiu o sistema especialista como um programa inteligente de computador que utiliza conhecimentos e procedimentos de inferência para solucionar problemas que, sendo complexos o suficiente, requerem um especialista humano para a sua solução.

Os SE trabalham em áreas restritas do conhecimento, e são capazes de resolver problemas para os quais não existem algoritmos que levem forçosamente à solução. O seu campo de aplicação pode ser qualquer um que necessite da tomada de decisão de um especialista como: tomada de decisões financeiras; planejamento logístico e de tráfego; diagnósticos e monitoramento médicos e de máquinas e instalações;

previsões meteorológicas, de tráfego, crescimento demográfico, entre outros; projetos na seleção de materiais, processos componentes layout entre outros; vigilância e controle são apenas alguns exemplos.

Com o surgimento dos sistemas especialistas, foi introduzida uma nova filosofia de programação. A filosofia de programação dos códigos existentes até então, ditos convencionais, consistia no processamento de rotinas, sendo por isso denominado de programas procedimentais. Os SE, por meio de seus mecanismos de inferência, realizam o processamento simbólico do conhecimento contido em sua base de regras, durante o processo de inferência, podendo usar o encadeamento para frente ou para trás, dependendo das características do problema que é tratado.

No SE desenvolvido na presente proposta da base de conhecimento as regras foram programadas em CLIPS (*"C Language Integrated Production System"*), para apoiar o processo de seleção. CLIPS foi desenvolvido no Johnson Space Center da NASA em 1984. CLIPS é considerado uma ferramenta poderosa para o manuseio de uma dada base que admite três tipos de programação: do conhecimento na forma de regras, orientado a objetos e do conhecimento utilizando procedimentos do tipo funções e sub-rotinas (GIARRATANO, 2004). Esta versão do CLIPS é baseada no ambiente ECLIPSE que possui uma interface mais intuitiva, pode ter as interfaces programadas em JAVA, dentre outros recursos que facilitam o trabalho do programador.

Os SE são implementados pelo engenheiro do conhecimento que é um profissional da área da computação que sabe projetar programas que incorporam técnicas de inteligência artificial. Para isso, faz uso da engenharia do conhecimento, que é a arte de desenhar e construir um SE (VINADÉ 2003). Este profissional usa técnicas e ferramentas para aquisição e representação do conhecimento. Assim, ele aprende como os especialistas resolvem os problemas e traduz este conhecimento em uma linguagem de programação.

2.9 Aquisição de conhecimento

Segundo Buchanan, Barstow e Bechtel (1983) a aquisição do conhecimento pode ser definida como a transferência e transformação do conhecimento especializado,

com potencial para a resolução de problemas, de alguma fonte de conhecimento para o SE. O processo de aquisição do conhecimento ainda é o gargalo na construção dos SE (REZENDE, 2003). Em função disso, muitos esforços têm sido destinados para sistematizar ou automatizar esse processo.

Neste trabalho, pode ser observado no capítulo 4 o método usado para adquirir o conhecimento e suas especificidades para a montagem da base de dados deste SE.

2.10 Sistemas especialistas aplicados na seleção de componentes

Um levantamento bibliográfico de artigos relacionados aos sistemas especialistas para a seleção de componentes, processos e materiais, foi realizado e suas principais características são apontadas a seguir.

Ahluwalia *et al* (1993) desenvolveram um SE que apenas seleciona e dimensiona diferentes tipos de rolamentos de rolos, considerado a posição de sua montagem no eixo e também do tipo de carregamento (se é oriundo de uma engrenagem, polia, ou outro elemento de transmissão). De acordo com as respostas dos usuários, este SE faz a seleção do tipo de rolamento, usando o método multicritério Topsis. Para o dimensionamento dos rolamentos, há um módulo de cálculo programado em Turbo Pascal. Este é um dos trabalhos pioneiros e referência no uso de SE para a seleção de componentes mecânicos, sendo um dos mais referenciados pelos autores que desenvolveram trabalhos similares posteriormente.

Entre os configuradores, podemos destacar o SE desenvolvido por Ferguson *et al* (1999) para a seleção de componentes de transmissão de potência usados apenas em caixas de transmissão e redutores. Os configuradores têm como característica principal a seleção e dimensionamento de um ou mais tipos específicos de componentes para um equipamento. A seleção e dimensionamento pode ser de apenas um componente, ou de vários, porém, quando atuam com mais de um componente, está previamente estabelecido quais desses componentes estarão conectados entre si. Nesse trabalho, o sistema seleciona os pares de engrenagens, faz seu dimensionamento e determina o número de estágios necessários para obter uma determinada relação de transmissão. Assim, nesse configurador, as engrenagens e os rolamentos sempre estão acoplados no eixo. Além disso,

dimensiona os eixos e seleciona 4 tipos de rolamentos, levando em consideração aspectos como DFM e DFC. O processo de seleção é feito com um SE por meio de regras.

Tucho *et al* (2003) criaram um configurador para dimensionar os componentes de um modelo específico de ponte rolante. Este SE também é usado no ensino da disciplina de projetos. O configurador em questão é constituído por um SE baseado no shell KAPPA-PC que foi integrado a uma base de dados e a programas de cálculo e análise de componentes. Desta forma, este SE dimensiona os motores, redutores e rolamentos, entre outros componentes, para a ponte rolante. Não é possível usá-lo para outros tipos de projeto, pois a base de conhecimento é específica para este tipo de pontes rolantes, de forma similar a outros configuradores que apenas são aplicados a um tipo específico de equipamento.

Ashby *et al* (2004) desenvolveram um método para seleção de materiais e processos que utiliza tanto informações numéricas quanto informações empíricas (experiência e conhecimento) e não numéricas (booleanas e rankings). Uma parte dessas informações é retirada de manuais e catálogos, porém outra parte é adquirida através de testes e experiências laboratoriais, além do conhecimento de especialistas em aplicação de materiais. São propostas 3 estratégias para a seleção do material e o processo:

- **Análise Quantitativa:** São informadas as funções, restrições e objetivos desejados. Essas informações devem ter uma forma que possa ser analisada por métodos padrões de engenharia, por exemplo, equações e desigualdades;
- **Questionários:** São feitas perguntas baseadas na forma como os especialistas trabalham, visando obter as informações de aplicação necessárias para a escolha;
- **Analogias:** O uso do material/processo a ser escolhido é comparado com outro já utilizado em aplicações similares.

As estratégias podem ser utilizadas de forma independente ou misturadas, conforme o caso sendo estudado. O processo de seleção se dá por meio de três etapas principais:

- **Eliminação:** onde material e processo são incompatíveis e também não atendem a um requisito de projeto que é fundamental;
- **Ranqueamento:** por meio de métricas um conjunto de materiais e processos são ordenados em ordem que melhor atendem aos requisitos;
- **Informações:** nesta etapa são consideradas as experiências dos especialistas, os recursos de fabricação disponíveis, etc.

Assim, este SE pode fazer a seleção de um determinado tipo de material considerando as especificações do projeto e levando em conta o processo de fabricação ao qual será submetido. A relação entre material e processo muitas vezes se mostra crítica do ponto de vista da viabilidade econômica e do processo.

Luo *et al* (2010) propuseram um SE para seleção de revestimentos tribológicos. Para isso, é realizada primeiramente uma pré-seleção, na qual são informados todos os requisitos e necessidades a serem atendidas, e então o sistema começa a eliminar os revestimentos que não atendem essas especificações. Posteriormente, os revestimentos restantes são avaliados por um método multicritério similar ao SAW, no qual as notas de desempenho são derivadas de um ranking (bom, ruim, etc) e o peso é uma função similar às funções de preferência do método PROMETHEE. Essa etapa é realizada com as informações de bancos de dados e catálogos. A seleção final utiliza informações relacionadas a testes, aplicações similares e experiência em aplicações.

Watanabe *et al* (2011) desenvolveram um método para seleção de rolamentos utilizando lógica *fuzzy* e o método multicritério TOPSIS. Com base em regras previamente definidas e nos números *fuzzy* para características de rolamentos, é criada uma matriz de decisão *fuzzy*. Os pesos desta matriz vêm da multiplicação dos valores das características dos rolamentos pelo correspondente requisito de projeto. As informações para a criação da matriz foram retiradas de um catálogo de um fabricante. Então com os pesos e com a matriz montada é aplicado o método multicritério TOPSIS, para o ranqueamento dos rolamentos que melhor satisfazem os requisitos do projeto.

Perzyk e Meftah (1997) propuseram um SE para a seleção de processos de fabricação, em especial processos de moldagem. Ele analisa diversas alternativas de processos e cria um ranking entre eles. Para isso, utiliza informações como a

capacidade do processo em atender aos requisitos, a compatibilidade com as diretrizes DFM e a processabilidade dos materiais. Essas informações são tanto numéricas quanto rankings. O ranqueamento final dos processos é dado por um índice calculado a partir do desempenho dos processos.

Motz e Haghghi (1991) desenvolveram e implementaram módulos de projeto para um sistema especialista já existente (XPRING), focado no dimensionamento e seleção de molas. O sistema proposto incorpora vários módulos de projeto como: módulo de CAD, um módulo de análise de falha e fadiga, um módulo de otimização, e um Módulo FEA, que irá interagir através de um sistema especialista para atingir os objetivos do projeto com base em restrições pré-especificadas. A comunicação entre o usuário final e o sistema especialista é feita através de uma interface gráfica. No início de um projeto, as especificações do mesmo são passadas para um módulo baseado em um SE, que gerencia módulos específicos de conhecimento de projeto sob seu controle. O módulo principal é responsável por determinar quando um módulo de projeto pode contribuir com a solução e, então, é ativado. Assim, a mola é dimensionada e selecionada por um módulo que trabalha os critérios selecionados no projeto.

Sim e Chan (1991) desenvolveram um SE chamado EXSORBS baseado no *shell* XiPlus, integrado a um banco de dados para a seleção de rolamentos, além disto tem um módulo de dimensionamento integrado de forma a calcular o tamanho do rolamento que atenda aos requisitos de projeto.

Mok *et al* (2006) desenvolveram um SE, utilizando o *shell* CLIPS/JESS e programas JAVA, para a seleção de processos de injeção de plástico para operar em ambiente de internet. O SE opera em conjunto com o programa CAD SolidWorks. Para a seleção, são feitas perguntas sobre os requisitos da aplicação ao usuário, e após cada resposta, o sistema vai eliminando algumas opções de processos que não atendem tais requisitos e faz a próxima pergunta. Os processos são escolhidos através de regras do tipo *IF-THEN*. As informações utilizadas para a seleção foram encontradas em manuais, catálogos e especialistas. Essas informações podem ser atualizadas, visto que o sistema possui conexão com a internet.

Er e Dias (2000) desenvolveram um SE usando o *shell* Crystal para auxiliar no projeto de peças fundidas e para seleção do processo de fundição mais adequado a

esta peça. O sistema possui informações sobre os processos obtidas de manuais, catálogos, artigos e especialistas da área. Os requisitos são definidos através de perguntas do tipo “sim/não” feitas ao usuário e a escolha é feita comparando todos os processos, sendo que somente aqueles que atendem a todos os requisitos podem ser escolhidos. Se mais de um processo chega ao final dessa análise, então o processo selecionado será aquele que apresentar o menor custo.

Gates (2015), este é um SE desenvolvido em Java da empresa The Gates Corporation, pode operar pela internet usando a base de dados e os algoritmos instalados no servidor da empresa, e sua interface com o usuário é feita em Java e roda nos principais navegadores de internet. Outra opção é a instalação da base de dados no computador do usuário. Este SE é específico para a seleção de correias e polias de transmissão de potência fabricadas pela própria empresa. Outros fabricantes como Goodyear, Megadyne, Continental, Optibelt entre outras possuem SE similares para os mesmos tipos de componentes.

A maioria dos grandes fabricantes de componentes possuem SE desenvolvidos para a seleção e/ou dimensionamento dos componentes que fabricam, com o intuito de conquistar e fidelizar os clientes aos seus produtos. Estes SE estão desenvolvidos para rolamentos, componentes pneumáticos e hidráulicos, atuadores eletroeletrônicos, moto redutores, entre outros.

Pode se observar pela revisão bibliográfica que não existem SE que selecionam componentes de diferentes grupos funcionais, mesmo que para um domínio específico. Os que têm sido desenvolvidos são SE específicos para uma determinada classe de componentes, como rolamentos ou componentes de transmissão mecânica.

Os configuradores são um tipo de SE desenvolvidos para auxiliar e tornar o projeto de um tipo específico de produto, que é composto por vários componentes, mais rápido. Isto é observado nos SE mostrados para pontes rolantes e redutores, por exemplo. Estes SE configuram o mesmo produto, que possuem componentes previamente selecionados e são apenas dimensionados, de modo a atender diferentes capacidades.

Muitos SE, que selecionam materiais ou uma determinada classe de componentes com muitos tipos, fazem uso dos métodos multicritério para o ranqueamento. Alguns

usam um mecanismo que, para determinado valor de importância dado a um requisito, faz com que o mesmo seja eliminado por não atender ao requisito. Assim, são ranqueados apenas aqueles capazes de serem usados na aplicação.

Certos SE fazem uso de métodos multicritério para ranqueamento da alternativa mais viável, além de usarem regras para chegar a um resultado mais específico de alternativas. Também tem sido muito utilizados algoritmos de cálculo que dimensionam a alternativa melhor ranqueada.

Observou se que não há SE que levem em consideração a compatibilidade das interfaces entre os componentes. Assim sendo, neste método são usadas matrizes de dependência elaboradas pelo especialista para a descrição dos requisitos das interfaces entre componentes. A partir destas descrições o engenheiro de software as usa como regras que descrevem os requisitos de compatibilidade das interfaces. Não há outros SE com estas características principalmente, pelo fato de não haver até então um método estruturado para a captura do conhecimento dos requisitos das interfaces dos componentes, e também por não haver um método que descreva os requisitos das interfaces entre dois componentes específicos que irão se acoplar. Como a estruturação deste conhecimento é totalmente dependente dos especialistas, é imperativa a existência de um método específico para a extração deste conhecimento, de forma a tornar este trabalho produtivo e com qualidade.

Foi feita uma intensa pesquisa em bases de dados científicas e também na internet e foi constatado que não existe nenhum *software* que selecione componentes considerando, além dos requisitos de aplicação, os seguintes pontos:

- O custo de fabricação para a compatibilização das interfaces da peça onde o componente selecionado irá se acoplar;
- O custo logístico associado aos processos de fabricação necessários a compatibilização das interfaces;
- Os recursos de fabricação da planta onde será executada a fabricação das peças;
- Os recursos logísticos disponíveis;
- Diretrizes de projeto que norteiam o processo de seleção de todos os componentes de um conjunto e/ou produto;

- Além de dimensionar os componentes selecionados, também dimensiona o tamanho necessário das interfaces da peça para que o componente que está sendo selecionado possa se acoplar;
- Apresenta os processos de fabricação necessários a compatibilização das interfaces, seus requisitos e seus custos;
- O software também permite que sejam vistas todas as alternativas possíveis de serem usadas, porque foram usadas, as características e atributos dos componentes que podem ser usados e dos que foram excluídos do ranqueamento, e o motivo da exclusão;
- O software além de documentar o processo de seleção também torna este processo padronizado em função de se usar apenas uma ferramenta no processo de seleção dos componentes de um produto por estar baseada em uma base de dados única e padronizada.

3 MÉTODO PARA DESENVOLVIMENTO DA BASE DE CONHECIMENTO DE UM SE PARA SELEÇÃO DE COMPONENTES MECÂNICOS

Este capítulo apresenta o método para o desenvolvimento de um SE baseado em uma base de conhecimento apresentada nesta pesquisa para a seleção de componentes mecânicos. Também apresenta um método para a aquisição de conhecimento, etapa necessária à elaboração de um SE, utilizando os conceitos apresentados nos capítulos anteriores, de acordo com os objetivos definidos no Capítulo 1.

A atividade de selecionar um componente dentre várias opções possíveis ainda é, em geral, um processo manual e totalmente dependente do conhecimento e experiência do projetista, já que a realização desta tarefa deve levar em consideração uma série de critérios como, por exemplo, a compatibilidade entre o componente e as peças nas quais este será montado, custo logístico e os recursos disponíveis para a fabricação e montagem. Este procedimento torna-se mais crítico a medida que a experiência da equipe é menor, consumindo muito tempo dos projetistas. Assim, este trabalho propõe um método estruturado para desenvolver a base de conhecimento um SE, cujo objetivo é auxiliar projetistas no processo de seleção de componentes mecânicos.

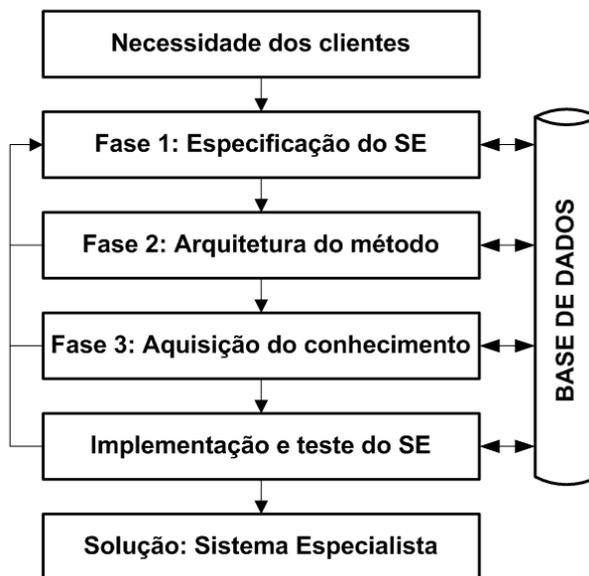
O SE desenvolvido por este método é para ser usado nas fases de projeto detalhado, e também preliminar. Para que possa ser usado é necessário que o projetista saiba os requisitos de aplicação necessários que o componente deve satisfazer. Além disto, para o dimensionamento do componente e das interfaces da peça onde o componente selecionado irá se acoplar, é necessário saber com precisão informações de solicitações mecânicas que o componente deverá suportar.

O método proposto para o desenvolvimento da base de conhecimento faz com que o desenvolvimento do SE seja estruturado e abrangente, para a construção de uma base de conhecimento. Além disso, foi desenvolvido de forma a ser flexível, podendo ser usado no desenvolvimento de SEs para diferentes domínios e com diferentes tipos de componentes.

Para um melhor entendimento do método, este é estruturado na forma de um fluxo ordenado de atividades, que está dividido em três fases, mostradas na Figura 3-1.

Cada uma destas fases é dividida em várias etapas, sendo que as mesmas são compostas de uma ou mais tarefas. A implementação e testes que compreende a programação e depuração do SE, feitas pelo do engenheiro de software e programadores, não será abordada neste trabalho. O detalhamento de cada uma das fases desta proposta é abordado ao longo do texto.

Figura 3-1: Fluxograma de atividades para a implementação do método



Fonte: Própria

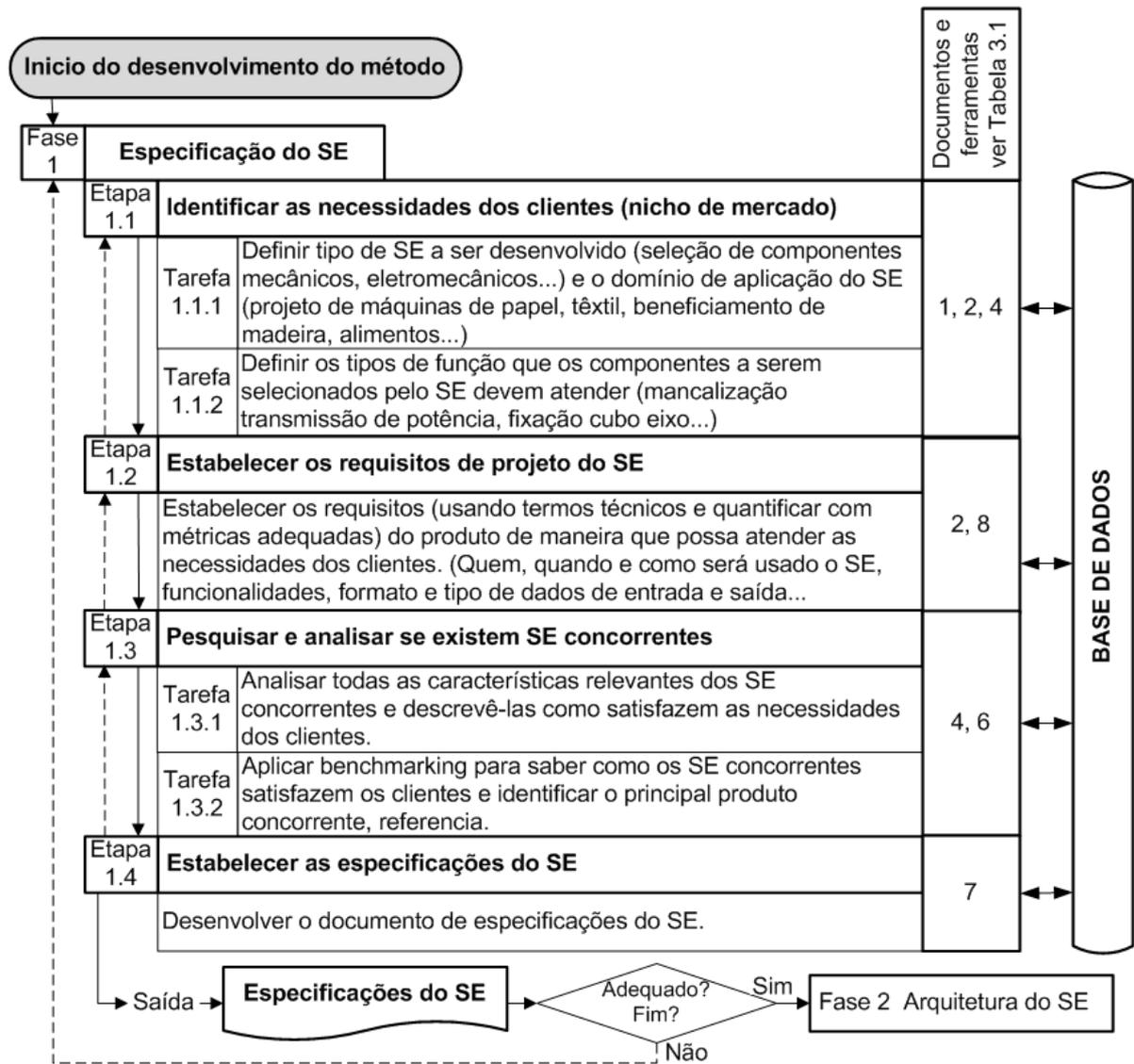
3.1 Fase 1: Especificação do SE

Nesta primeira fase do projeto do SE, são definidas as suas especificações a partir das necessidades dos clientes para um dado domínio, estruturando-as na forma de requisitos. Para que o SE cumpra seu objetivo de maneira eficiente, é de fundamental importância que os requisitos sejam objetivos e tenham qualidade (PARRA et al. 2015).

Uma criteriosa análise das especificações deve ser feita por especialistas que, preferencialmente, tenham bom conhecimento do domínio para o qual o SE está sendo desenvolvido. O intuito disto é atender as necessidades dos usuários, dotando o SE de recursos que tornem o trabalho dos projetistas mais produtivo e com resultados confiáveis.

O detalhamento desta fase é mostrado na Figura 3-2, onde podem ser vistas as diversas etapas a serem realizadas de forma a se obter as especificações do SE. Como o foco deste trabalho são as fases que compreendem a aquisição de conhecimento e a arquitetura do método do SE, não será dada ênfase à esta fase de especificação.

Figura 3-2: Fluxograma de atividades para a especificação do SE



Fonte: Própria

A Tabela 3-1 mostra alguns documentos e ferramentas de apoio que podem ser utilizadas nas fases de projeto do método, como mostrado na Figura 3-2. Os próximos itens deste capítulo (3.1.1 a 3.1.4) descrevem em maior detalhe as etapas apresentadas na Figura 3-2.

Tabela 3-1 - Documentos e ferramentas de apoio para o desenvolvimento do método

Nº	Documentos e ferramentas de apoio para o método
1	Ordem de serviço
2	Brainstorming, entrevistas, questionários, observação
3	Catálogo de informações técnicas, livros, manuais técnicos, <i>handbook's</i>
4	Sistema de busca em base de dados de patentes, tecnologia, normas e fornecedores
5	<i>Softwares</i> com funções específicas a determinadas tarefas
6	Análise dos produtos concorrentes Benchmarking
7	Quadro ou lista de especificações do produto
8	Taxonomia
9	Metodologias e ferramentas de projeto como DFQ, DFM, DFA, MD, etc.
10	Matrizes de decisão e dependência
11	Cálculo e modelagem matemática
12	Métodos multicritério
13	Sistemas CAD, CAE, CAM
14	Matriz de seleção dos princípios de solução
15	Técnicas de revisão de projetos

Fonte: Própria

3.1.1 Identificar as necessidades dos clientes

Nesta etapa, é identificada a necessidade ou demanda de um produto por parte dos consumidores. No caso-exemplo a ser descrito posteriormente neste trabalho, a demanda partiu dos projetistas do setor de máquinas de processamento de papel por uma ferramenta que os auxiliasse no processo de seleção de componentes mecânicos, tornando a tarefa automatizada e rápida.

3.1.1.1 Pesquisar pelo tipo de SE a ser desenvolvido e o domínio de aplicação

A primeira tarefa é a definição do tipo de SE a ser desenvolvido. É nesta tarefa que se observa uma necessidade ou oportunidade de desenvolver uma ferramenta que pode ser explorada como um produto, por exemplo, um SE para seleção de componentes mecânicos, eletrônicos, mecatrônicos, entre outros. No caso específico deste trabalho, o SE será desenvolvido apenas para componentes mecânicos. Um aspecto muito importante é definir o domínio de aplicação, isto é, para que tipos de projetos mecânicos o SE será desenvolvido para selecionar os componentes.

3.1.1.2 Definir as funções a serem implementadas no SE

As funções a serem implementadas estão diretamente relacionadas ao domínio de aplicação, pois cada domínio tem um conjunto de funções necessárias para que o projeto possa ser executado. Além disto, as funções para diferentes domínios possuem certas classes e tipos de componentes que são em muitos casos específicos a seus projetos.

3.1.2 Estabelecer os requisitos de projeto do SE

A estruturação dos requisitos do SE é feita usando várias técnicas como *brainstorming*, entrevistas, questionários, experiência dos especialistas, observação de como os potenciais usuários trabalham e que recursos ou funcionalidades gostariam que o SE possuísse. Esta etapa deve ser desenvolvida com especial atenção, para que se possa capturar com precisão o que os usuários desejam, já que um erro nesta fase irá gerar um erro de conceito no desenvolvimento do SE.

3.1.3 Pesquisar e analisar os SE concorrentes

Nesta etapa serão analisados e comparados os recursos dos SE que tenham o mesmo propósito caso existam.

3.1.3.1 Analisar as características dos SE concorrentes

As etapas de estabelecer os requisitos e a análise de SE concorrentes devem ser feitas paralelamente. Neste trabalho, esta tarefa é a parte da pesquisa bibliográfica dos SE para a seleção de componentes. Esta análise permite que se detecte as oportunidades não exploradas neste campo, como o uso de recursos e técnicas que tornem o processo de seleção mais produtivo e confiável. Em outras palavras, os métodos e ferramentas que os SE existentes usam no processo de seleção devem ser analisados, levando em consideração como as informações de entrada são inseridas, quais informações são estas e como os resultados do processo de seleção são apresentados.

Esta análise permite observar quais as boas ideias que já existem e que podem ser reutilizadas no SE em desenvolvimento, bem como identificar pontos fracos de projetos concorrentes que podem ser corrigidos no novo projeto.

3.1.3.2 Aplicar um *benchmarking* entre os SE concorrentes

O *benchmarking* é feito por meio de uma matriz cujas linhas representam os SE pesquisados e cujas colunas apresentam os recursos e ferramentas disponíveis. Esta comparação verifica qual SE pode ser um concorrente mais forte, os que não apresentam concorrência, ver os pontos fortes e fracos, detectar recursos ainda não disponibilizados aos usuários pelos SE existentes.

3.1.4 Estabelecer as especificações do SE

As especificações são desenvolvidas com base nas informações dos requisitos de projeto, além da análise e *benchmarking* dos SEs concorrentes. Elas devem ser estabelecidas pelo especialista e pelo engenheiro de software, de forma que este documento possa orientar a construção de um SE que atenda às necessidades dos clientes e apresente resultados confiáveis, levando em consideração os principais aspectos que influenciam no processo de seleção de um componente. Além disto, tal documento deve prever que o SE a ser desenvolvido tenha uma interface amigável, intuitiva, de modo a tornar sua utilização mais produtiva. Deve prever, também, que o SE tenha uma relação equilibrada entre recursos e custo.

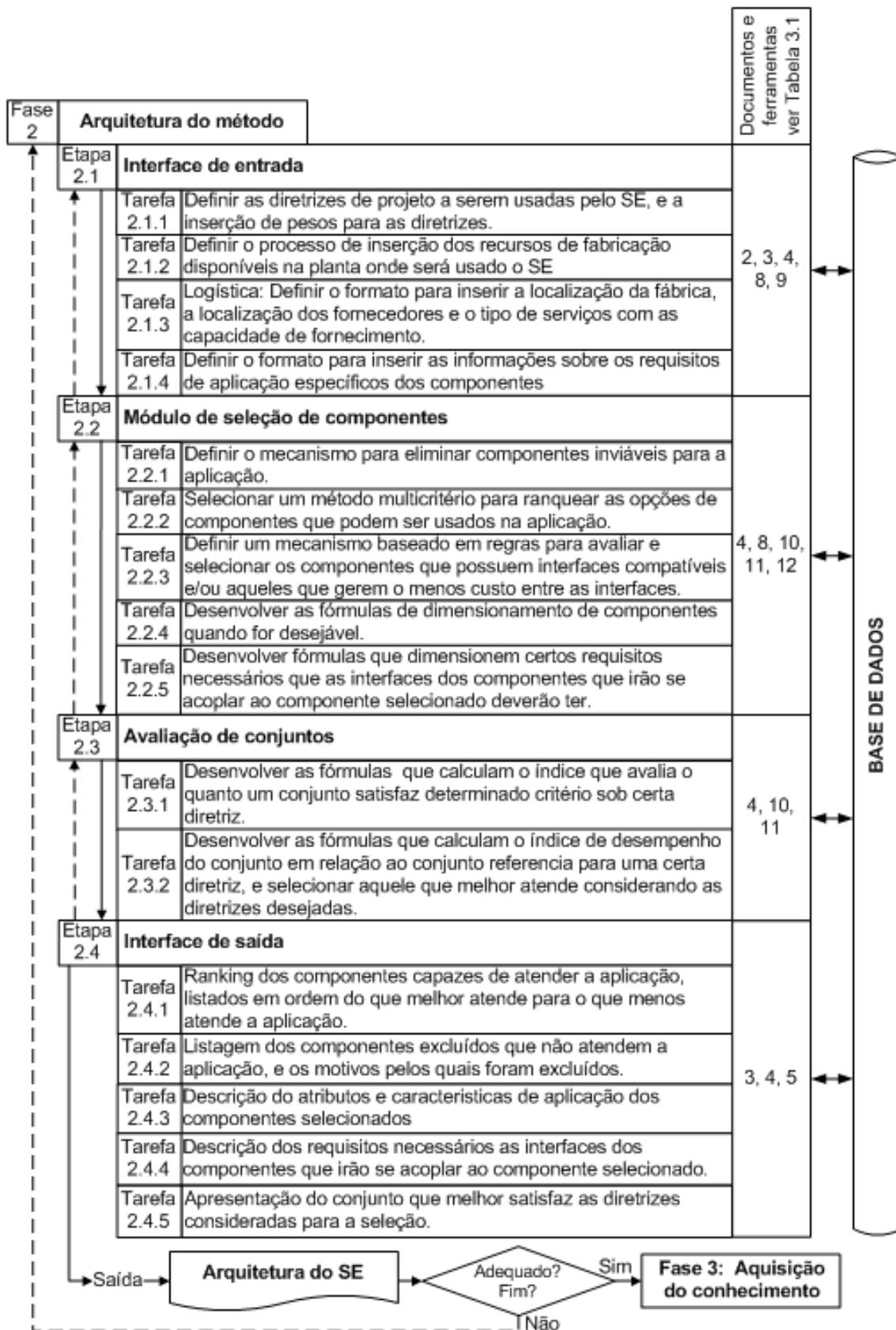
3.2 Fase 2: Arquitetura do método para desenvolvimento do SE

Na segunda fase, é desenvolvida arquitetura do método, de forma modular e é constituída por quatro módulos: interface de entrada, módulo de seleção, avaliação de conjuntos e interface de saída. A Figura 3-3 apresenta quais as etapas para o desenvolvimento da arquitetura do método do SE, que serão descritas em detalhe ao longo do texto. Além disto, a Figura 3-4 mostra como os módulos interagem entre si.

3.2.1 Interface de Entrada

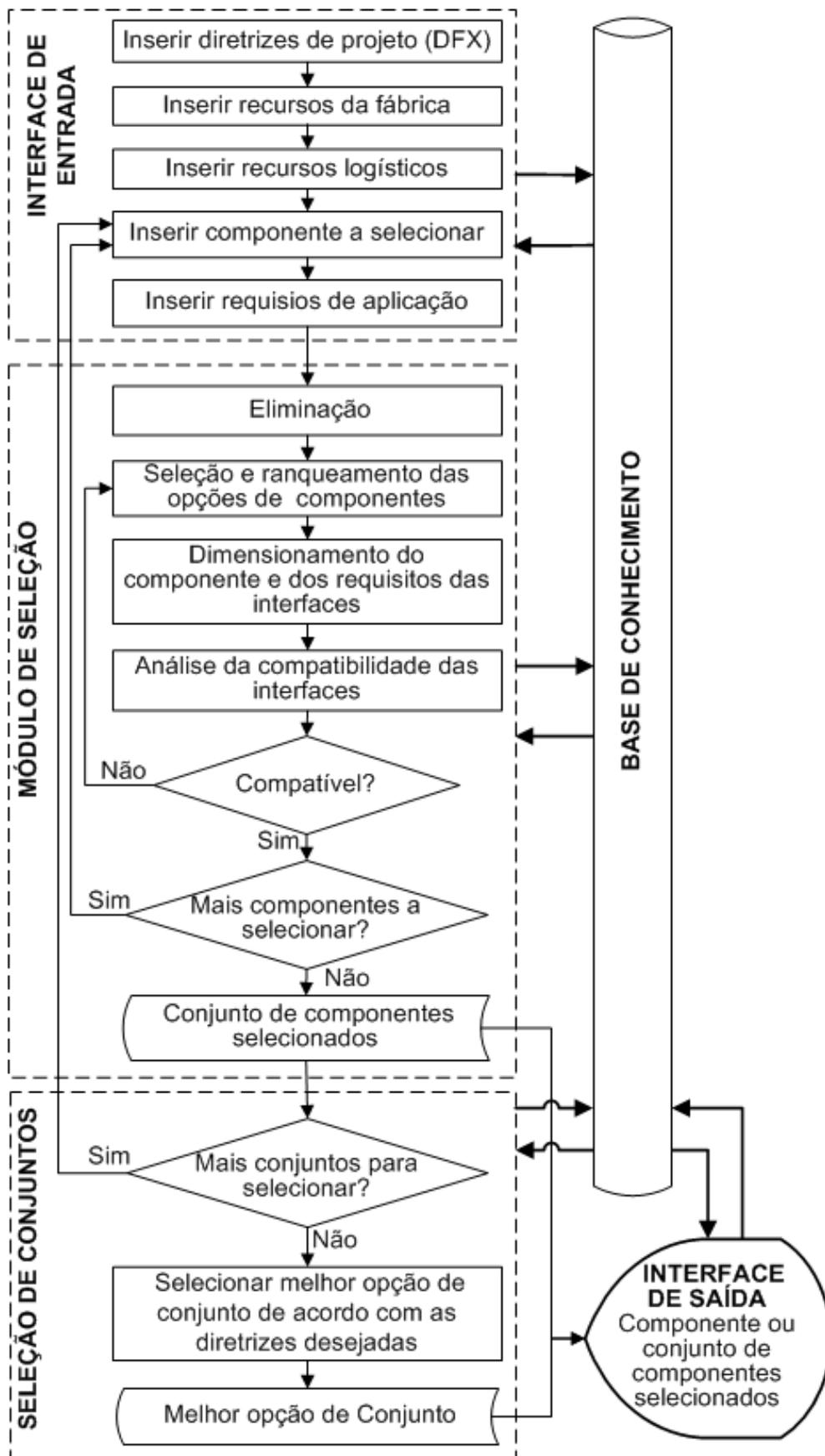
A interface de entrada é o meio pelo qual o projetista irá informar ao SE que componentes irá selecionar, que diretrizes de projeto irá priorizar, quais recursos de fabricação dispõe na fábrica, os recursos logísticos disponíveis e quais critérios a serem considerados. As perguntas dos critérios, que são específicas para cada grupo funcional, são feitas pelo SE baseadas nas matrizes de decisão que foram implantadas na base de conhecimento pelo engenheiro de conhecimento.

Figura 3-3: Fluxograma para o desenvolvimento da arquitetura do SE



Fonte: Própria

Figura 3-4: Fluxograma de integração da arquitetura do SE



Fonte: Própria

3.2.1.1 Diretrizes de Projeto

Para atender a crescente competitividade e a necessidade de diminuição do ciclo de desenvolvimento de produtos, diretrizes de projeto são desenvolvidas pensando no uso de engenharia simultânea. Em projetos de grande complexidade, que geralmente envolvem várias equipes trabalhando em paralelo, surge a necessidade de garantir que estas equipes desenvolvam o projeto de forma coerente. Para tal, estas equipes precisam trabalhar seguindo as mesmas diretrizes, que são desenvolvidas a partir de metodologias DFX.

No método deste SE, as diretrizes ou requisitos comuns a todos os conjuntos e componentes do projeto são informadas pelo projetista apenas uma única vez, na interface de entrada. Isto é feito por meio de um peso, ou grau de importância que se quer dar a cada uma delas no início do processo de seleção dos componentes. A partir daí todas as equipes do projeto irão usar as mesmas diretrizes, e todos os componentes serão selecionados de forma a atender as diretrizes que foram priorizadas, ou que possuem os maiores pesos.

Neste método, a interface de entrada do SE pergunta ao projetista qual o peso (ou seja, a importância que irá atribuir) de uma determinada diretriz. O projetista deve, portanto, responder com um peso que varia de 0 a 10. Caso uma determinada diretriz não deva ser considerada pelo SE, o projetista responde com zero. Estes pesos são usados pelo método multicritério para fazer o ranqueamento das alternativas de componentes, e também no momento em que o SE irá selecionar a melhor alternativa de conjunto baseado no critério de maior peso. A seguir, estão listados exemplos de perguntas que a interface de entrada faz ao projetista em relação às diretrizes de projeto:

- DFC (Design for Cost)? Inserir peso.
- DFA (Design for manufacturing)? Inserir peso.
- DFA (Design for assembly)? Inserir peso.

3.2.1.2 Recursos de Fabricação

É amplamente reconhecido que a utilização de métodos e ferramentas para integrar informações de fabricação no processo de projeto deve ser realizada tão cedo

quanto possível (SWIFT, 2003). Quando o processo de seleção dos componentes de um projeto é realizado por completo na mesma fábrica, o projetista informa na interface de entrada do SE os recursos de fabricação disponíveis, como tornos, centros de usinagem, fresadoras, etc. Isto deve ser feito porque os componentes a serem selecionados irão ser acoplados à outras peças, que necessitarão ser fabricadas.

Os recursos de fabricação têm ligação direta com a diretriz DFM. Assim, se o projetista informa que em sua fábrica não há meios de fabricar as peças necessárias, ou que estes recursos estão indisponíveis por excesso de demanda, ele poderá dar um peso elevado para a diretriz DFM. Isto fará com que o SE selecione prioritariamente componentes que exijam pouco ou nenhum recurso de fabricação para as peças a serem fabricadas nas quais irão se acoplar.

Além disto, os recursos de fabricação têm relação direta com o aspecto logístico, já que, se uma fábrica não possui determinado recurso de fabricação, poderá terceirizar tal serviço, acarretando em custos logísticos e de fabricação terceirizados. No método, para este SE serão considerados dois tipos de equipamentos para fabricação: torno e centro de usinagem. Se o recurso estiver disponível em sua fábrica, o projetista deverá informar, na interface de entrada, o tamanho máximo de peça usinável por seu equipamento. Tal informação é inserida como ilustra a lista a seguir:

- Torno? (Diâmetro, comprimento)
- Centro de usinagem? (Largura x, comprimento y, altura z)

Se a planta não possuir estas máquinas, as respostas destas perguntas devem ser preenchidas com 0. A capacidade de usinagem das máquinas é importante pois se o torno da fábrica não comporta a peça a ser torneada, por exemplo, a terceirização do serviço é necessária.

3.2.1.3 Aspectos Logísticos

Quando um projeto é desenvolvido, dependendo do local onde está a fábrica, é necessário um cuidado especial em relação aos componentes usados, pois alguns podem ter um impacto logístico muito grande no projeto. Por exemplo, um componente importado pode implicar tanto em um custo logístico elevado, quanto em

um prazo de entrega muito longo devido aos trâmites aduaneiros, ao processo de importação complexo ou a logística de transporte deficiente.

Um aspecto a ser considerado é a proximidade de fornecedores de peças e serviços. Muitas vezes, a fábrica não dispõe de determinados recursos de produção que um componente selecionado exige para fabricação da peça onde este será montado. Assim, a fabricação desta peça pode ser terceirizada. Porém, se não houver fornecedores próximos, isto pode criar restrições logísticas que podem comprometer o projeto do ponto de vista de custo e/ou tempo de fornecimento. Assim sendo, a solução para isto é selecionar apenas componentes que exijam pouco ou nenhum recurso de fabricação que a fábrica não disponha para as peças onde serão montados, e que tenham logística de fornecimento fácil.

Quando foi informado ao SE a ausência de recursos de fabricação, o projetista informa na interface de entrada, na parte logística do SE, a distância em km dos fornecedores terceirizados dos recursos de fabricação necessários. Assim, o SE poderá calcular o custo logístico multiplicando o valor do frete em R\$/kg/km, que consta na tabela da NTC presente no SE, pelo peso em kg da peça que precisa de um processo de preparação de sua interface. Desta forma, o SE pode comparar as diferentes opções de componentes considerando o custo logístico, quando necessário.

Se a localização da fábrica for em um local de difícil logística, isto poderá ser considerado por uma diretriz de projeto, que adicionará um peso a este critério. De forma análoga, se houverem poucos fornecedores de serviços que forem necessários para a fabricação das peças, isto irá influenciar também no aspecto de facilidade de fabricação. Assim, o projetista responde com um peso na diretriz logística se a fábrica está em um local logisticamente adequado, e se há fornecedores de serviços por perto quando necessário. Em certos casos a fábrica não precisa terceirizar a fabricação pois tem os meios e recursos necessários a produção. Assim, o projetista informa a distância da fábrica ao fornecedor de serviço de cada máquina, por exemplo:

- Torno? (Km)
- Centro de usinagem? (Km)

Quando o projeto de um produto é composto de vários conjuntos e é realizado por equipes diferentes, em fábricas e locais diferentes, as diretrizes do projeto devem permanecer as mesmas. Isto é necessário para que haja coerência no projeto e todos os conjuntos sigam as mesmas diretrizes definidas. Porém, os recursos da fábrica e os logísticos são ajustados especificamente para a realidade local onde a fabricação e montagem serão executadas. Isto é feito no início do processo de seleção na interface de entrada do SE.

3.2.1.4 Requisitos de Aplicação

Depois que o projetista inicia o processo de seleção e responde quais diretrizes deseja priorizar, quais os recursos de fábrica e os logísticos, irá então selecionar um grupo funcional. Neste momento, o sistema especialista irá apresentar ao projetista um questionário dos requisitos de aplicação que o componente deverá atender, que será respondido com o valor de 0 a 10.

O projetista deverá responder “0” se um determinado requisito não é necessário. E irá atribuir um valor entre 1 e 10, entretanto, o SE irá considerar este requisito, e de forma mais importante quanto maior o valor respondido. Estas perguntas são as mesmas feitas nas matrizes de decisão, pelos especialistas, e implantadas no SE pelo programador e/ou engenheiro de software.

Somente as perguntas dos critérios respondidas com valores diferentes de “0” formarão a matriz de decisão para que um método multicritério possa ranquear o componente deste grupo funcional que melhor satisfaz as necessidades do projeto. Alguns requisitos precisam ser preenchidos com valores de unidades como torque, rotação e tensão de escoamento, para que o SE possa dimensioná-los, além de selecionar a faixa de aplicação.

3.2.2 Módulo de Seleção

Esta parte do SE é responsável pelo ranqueamento dos componentes que atendem a todos os requisitos. O módulo de seleção também elimina aqueles componentes que não atendem um determinado requisito necessário ao projeto.

O ranqueamento das possíveis alternativas é feito baseado nos seguintes critérios: custo do componente, custos de fabricação para compatibilizar a interface onde se acoplará e, quando aplicável, o custo logístico. Além disto, também pode ser feita uma simulação para testar diferentes alternativas de conjuntos e ver qual atende melhor uma determinada diretriz.

3.2.2.1 Eliminação

O processo de Eliminação constitui em retirar do ranqueamento os componentes que não são compatíveis com algum critério de seleção. Este processo ocorre quando o SE detecta um valor de zero na matriz de decisão, em um índice de desempenho, para um critério que deve ser considerado na seleção, ou seja, que foi respondido com um valor entre 1 e 10.

Por exemplo, na seleção de uma transmissão, se o projetista definir que não é permitida a lubrificação de componentes, todos aqueles ranqueados como correntes e engrenagens que usam lubrificantes serão eliminados da seleção, pois seu índice de desempenho é zero. Como resultado desta etapa, serão ranqueados apenas os componentes capazes de serem utilizados no projeto. Segundo Ashby et al (2004), este procedimento é importante pois depura a lista de alternativas de forma que restem apenas os componentes que podem cumprir os requisitos do projeto.

3.2.2.2 Seleção e ranqueamento das alternativas de componentes

Nesta parte do módulo de seleção, o SE faz uso de um método multicritério para um pré ranqueamento das alternativas possíveis de serem usadas em função dos apenas dos requisitos de aplicação que o SE pergunta, e o projetista responde com pesos atribuídos na interface de entrada. Estes pesos para os requisitos de aplicação que o projetista atribui, tem valores variam de 1 para pouco importante até 10 para um requisito muito importante. Quando o projetista responde com valor zero, isto significa que este requisito não é necessário e, portanto, não será considerado no ranqueamento pelo método multicritério. O ranqueamento neste SE é feito pelo método multicritério PROMETHEE-II, e considera o índice de desempenho de cada um dos requisitos de aplicação do componente a ser selecionado, que constam na matriz de decisão, juntamente com o peso ou grau de importância atribuído pelo projetista para cada um destes requisitos de aplicação.

A matriz de decisão é apresentada na Tabela 3-4, onde seus índices de desempenho foram calculados com pesos relativos entre as opções, sendo inserida na base de conhecimento do SE. O método multicritério PROMETHEE-II, é apresentado em mais detalhes no ANEXO A: MÉTODO PROMETHEE II.

3.2.2.3 Análise de Compatibilidade das Interfaces

Nesta etapa do processo de seleção, apenas as alternativas de componentes que podem ser usados estão ranqueadas, e sofrem um processo de análise dos requisitos da compatibilidade das interfaces das peças nas quais o componente selecionado deverá se acoplar. Isto é feito usando-se a matriz de dependência da qual se extrai o conhecimento, que é representado de maneira formal por meio de regras. Com o uso destas regras, o SE reduzirá a quantidade de opções possíveis de serem usadas, muitas vezes a apenas uma, que conseguirá atender a todos os requisitos de aplicação e as regras de compatibilidade.

A regra é escrita em uma sequência que se inicia por um IF (se uma ou mais condições são satisfeitas), THEN (este operador atesta a condição da ação). Assim, na execução do SE, se as condições de uma regra forem satisfeitas ela será disparada, isto é, a ação indicada pelo lado direito é executada.

Para um melhor entendimento desta etapa, será feito o uso de um exemplo onde deseja-se selecionar um componente para fixar uma polia em um eixo feito de uma barra redonda trefilada h9. Neste caso, o SE foi informado pelo projetista que a empresa quer apenas montar componente, ou seja, não deverão haver processos de usinagem.

A utilização de uma chaveta, portanto, é descartada, já que exige uma usinagem radial de precisão e do canal. As opções bucha QD (*Quick Detach*) e bucha TL (*Taper Lock*), pois exigem no eixo a usinagem do canal de chaveta. Assim, poderia ser usado apenas o anel de fixação, já que não exige processos de fabricação no eixo. A seguir é mostrada a regra deste exemplo.

Regra: IF (Componente: Barra redonda trefilada é usada = sim), AND (Recursos de fabricação: sem infraestrutura de usinagem = sim) AND, (Diretriz: Projeto para fabricação (DFM) \neq 0), THEN (Somente anel de fixação pode ser usado).

Se a intenção é apenas selecionar um componente, o processo de seleção está concluído e o componente selecionado é mostrado na interface de saída. Esta é uma situação menos comum, pois normalmente deseja-se selecionar os componentes e peças de um conjunto.

Se o objetivo é selecionar os componentes de apenas um conjunto, então o SE irá perguntar qual o próximo componente deste conjunto a ser selecionado e o processo irá se iniciar a partir dos requisitos de aplicação deste componente. As diretrizes, recursos de fábrica e logísticos são informados apenas uma única vez no início do processo de seleção dos componentes do projeto, pois não mudam para o projeto, desde que feitos na mesma planta.

O processo de seleção é repetido na forma de um *looping* e estará concluído quando todos os componentes comerciais do conjunto tiverem sido selecionados. Quando esta etapa estiver concluída, estes componentes são mostrados na interface de saída. O fluxograma da Figura 3-5 mostra em mais detalhes o processo de seleção do SE.

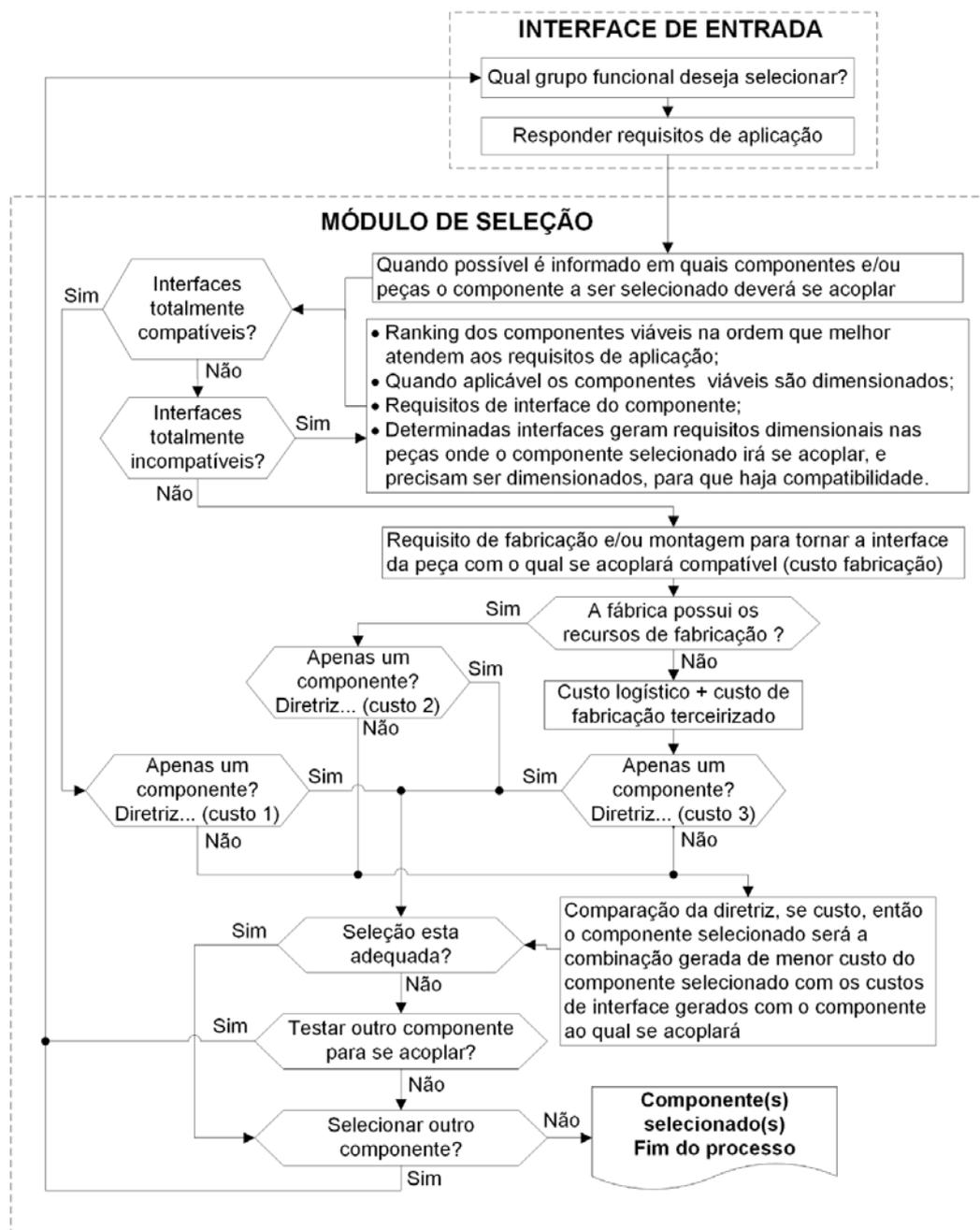
De acordo com o fluxograma da Figura 3-5, o SE começa o processo de seleção e ranqueamento analisando os requisitos de aplicação, fornecidos pelo projetista na interface de entrada. Caso existam componentes disponíveis no grupo funcional que não atendam a um determinado requisito de aplicação, o SE elimina estes componentes do ranqueamento. As alternativas viáveis (componentes que não foram eliminados) são, então, ranqueadas por um método multicritério, na ordem daquela que melhor atende aos requisitos de aplicação àquela que pior os atende.

A próxima etapa do processo de seleção é a análise da compatibilidade das interfaces entre os componentes e peças a serem acoplados. O SE deve, portanto, verificar se cada alternativa pode ser acoplada a peça presente no projeto. Para tal, o SE pode classificar cada alternativa de três maneiras diferentes:

- Completamente compatível: componente pode ser acoplado à peça sem a necessidade de um processo de fabricação em suas interfaces;

- Parcialmente compatível: para que o acoplamento ocorra, é necessária a realização de pelo menos um processo de fabricação para compatibilização das interfaces;
- Incompatível: o acoplamento entre o componente que está sendo selecionado não é possível na peça onde deverá se acoplar devido a restrições dimensionais do componente ou da peça e, portanto, esta alternativa de componente que está sendo selecionado será eliminada do ranqueamento.

Figura 3-5: Fluxograma de funcionamento do módulo de seleção do SE



Fonte: Própria

Para que o SE realize esta classificação, ele utiliza a matriz de dependência, que contém o conhecimento sobre as *features* necessárias para que o acoplamento entre o componente e a peça ocorra.

Para componentes parcialmente compatíveis, o SE saberá quais os requisitos que a interface da peça deverá atender para que os dois possam ter suas interfaces compatíveis e, assim, possam se acoplar. Estas interfaces são definidas pelas *features* (com características específicas como tolerância dimensional, rugosidade entre outras), que são obtidas por meio de processos de fabricação. Este conhecimento vem da matriz de dependência. Por exemplo, se um anel de fixação deve ser acoplado a uma barra redonda laminada, o SE identifica, na matriz de dependência, que o requisito da interface para o eixo é uma *feature* de usinagem radial com tolerância h9 (ou melhor).

Considerando os processos de fabricação para a compatibilização de interfaces, o SE verifica se estes processos podem ser realizados na fábrica ou precisam ser terceirizados. Esta verificação é importante porque a terceirização de um processo de fabricação impacta diretamente no custo final da alternativa, já que gera um custo logístico.

A seguir, o SE calcula o custo final de cada alternativa. Este cálculo é feito da seguinte maneira:

- Se a alternativa é completamente compatível, seu custo final é igual ao custo do componente (CC);
- Se a alternativa é parcialmente compatível, mas os processos de fabricação necessários à compatibilização das interfaces podem ser realizados pela fábrica, o custo final é dado pela equação 3.1:

$$C2 = CC + \sum_1^n CF_n \quad (3.1)$$

Onde C2 é o custo final, CC é o custo do componente e CF é o custo da feature, dado pela equação 3.2:

$$CF = VF * CVF + CS * TS \quad (3.2)$$

Onde:

VF = volume da *feature* (mm³) a ser usinada. Isto é calculado pelo SE como sendo o volume de material a ser removido da peça no estado bruto para que o componente possa ser acoplado nela;

CVF = custo de usinagem por volume (R\$/mm³), que depende do processo de fabricação, do material a ser usinado, da precisão e do tamanho da peça. Estes valores estão em uma tabela que faz parte do banco de dados do SE;

CS = Custo de setup (R\$/h), para cada processo de fabricação, levando em conta o tipo de máquina e o seu tamanho. Estes valores estão em uma tabela que faz parte do banco de dados do SE;

TS = Tempo de setup.

- Se a alternativa é parcialmente compatível, mas os processos de fabricação necessários à compatibilização das interfaces precisam ser terceirizados, o custo final é dado pela equação 3.3.

$$C3 = CC + CL + \sum_1^n CF_n \quad (3.3)$$

Onde C3 é o custo final, CC é o custo do componente, CF é o custo da *feature* (vide equação 4.2) e CL é o custo logístico, calculado pela equação 3.4:

$$CL = CT * P * D \quad (3.4)$$

Onde:

CT = custo específico do frete em (R\$/kg/km). Estes valores estão em uma tabela que faz parte do banco de dados do SE;

P = peso da peça, é calculado pelo SE com base nas informações dimensionais e do tipo de material que o projetista informa;

D = distância da fábrica até o fornecedor terceirizado de serviços de usinagem. Esta distância sempre é multiplicada por dois, pois é considerado um percurso de ida e volta.

Analisando o modo como o SE calcula o custo final de uma alternativa, é possível concluir que o fato de um componente ser mais barato que outro não significa que ele é a alternativa economicamente mais viável. Se o componente mais barato exige um

processo fabricação para ser acoplado, seu custo final pode ser maior que o de um componente que, apesar de mais caro, é completamente compatível.

Pelo fato do SE conferir agilidade no processo de seleção dos componentes, o projetista poderá desenvolver diferentes conjuntos que desempenham a mesma função, mas formados por diferentes componentes. Assim, o projetista poderá usar o SE para selecionar um conjunto, dentre vários, de acordo com uma ou mais diretrizes de projeto que desejar priorizar. Este processo é realizado na etapa de avaliação de conjuntos.

3.2.2.4 Dimensionamento de Componentes

Este SE, além de selecionar o componente mais adequado a uma aplicação particular, também pode, em paralelo ao processo de seleção, fazer o dimensionamento dos componentes. Pode haver casos onde possam ser implementados o dimensionamento de apenas alguns componentes ou de todos que se deseja selecionar.

3.2.2.5 Dimensionamento das interfaces de peças e componentes

Depois que um componente é selecionado e dimensionado o SE pode dimensionar automaticamente as interfaces da peça na qual este componente deverá se acoplar. Para tornar este processo de dimensionamento de interfaces mais claro, faz-se o uso de um exemplo no qual deseja-se selecionar um componente de fixação cubo-eixo.

Se o ranking de seleção mostra um anel de fixação, por exemplo, o SE o dimensionará a partir do torque informado e do diâmetro do eixo o anel. Além disso, dimensionará o diâmetro mínimo do cubo para suportar este anel a partir do material do cubo informado. O mesmo se dá para o eixo onde este anel será montado: se for um tubo, o SE dimensionará sua espessura mínima de parede em função do tipo de anel usado e do material do eixo informado.

3.2.3 Avaliação dos Conjuntos

A avaliação de uma alternativa de projeto tem por objetivo saber se a mesma atende as especificações. Esta avaliação pode ser feita por medições e/ou

comparações entre alternativas que consideram diretrizes como fabricabilidade, custo, entre outras (HUBKA e EDER 1996).

3.2.3.1 Algoritmo de avaliação do conjunto

Em um projeto, podem ter sido desenvolvidas mais de uma alternativa para um determinado conjunto, que pode ser constituído de diferentes componentes. Assim, o projetista pode usar o SE para selecionar o conjunto, dentre vários, que melhor atende determinada diretriz de projeto. A equação 3.5 propõe um índice faz avaliação de quando um conjunto satisfaz determinado critério sob certa diretriz. Os valores dos critérios estão na matriz de decisão que faz parte da base de conhecimento do SE, e as diretrizes tem seus pesos informados pelo projetista no início do projeto.

$$D_j = \frac{\sum_1^n X_{ij} \times DE_j}{n} \quad (3.5)$$

Onde:

D_j : é a avaliação do conjunto no critério j com a diretriz j ;

X_{ij} : é o índice de desempenho do componente i no critério j ;

DE_j : é peso da diretriz para o critério j ;

n : é o número total de componentes do conjunto.

3.2.3.2 Índice de desempenho do conjunto

Em alguns casos é necessário fazer um balanço entre as diretrizes, por exemplo, se a diretriz preço e fabricabilidade estão sendo consideradas, porém um conjunto é pior que outro no aspecto de custo, mas esta diferença relativa é pequena, e apresenta a diretriz fabricabilidade com uma diferença relativa para um ou mais conjuntos como uma diferença expressiva, isto pode decidir pela escolha entre um ou outro conjunto. Para isto pode ser feita uma análise do que seja mais viável, um conjunto com custo de componentes mais alto, mas compensado pelo aspecto da fabricabilidade bem mais vantajosa, que também irá influenciar no preço final. A equação 3.6 gera um índice de desempenho de um conjunto n com relação a outro conjunto que é tido como referência D_R , isto é, que possui o maior índice para uma determinada diretriz. Isto mede a diferença entre conjunto de referência D_R que apresenta o maior valor para uma determinada diretriz e os outros conjuntos para a mesma diretriz. Assim

diferentes conjuntos podem ser avaliados por diferentes critérios para orientar o projetista na seleção do mais apropriado. Isto pode ser feito por meio de uma tabela como a indicada na Tabela 3-2 para facilitar a visualização.

$$I_j = \frac{D_j}{D_R} \quad (3.6)$$

Onde:

I_j : é o índice de desempenho do conjunto na diretriz j em relação ao conjunto de referência D_R .

D_j : é a avaliação do conjunto na diretriz j ;

D_R : é a avaliação do conjunto de referência.

Tabela 3-2: Comparação entre índices dos critérios para diferentes conjuntos

Função do conjunto:				
	Diretriz 1	Diretriz 2	Diretriz 3	Diretriz j
Conjunto 1	D_{R11}	D_{R12}	D_{R13}	D_{R1j}
Conjunto 2	I_{11}			
Conjunto 3	I_{21}			
Conjunto i	I_{i1}			I_{ij}

Fonte: Própria

Como resultado desta etapa tem-se um conjunto selecionado, dentre vários, que atende uma ou mais diretrizes, o qual é mostrado na interface de saída.

3.2.4 Interface de Saída

A interface de saída é responsável por mostrar os componentes selecionados e suas informações, mesmo os que não foram considerados no ranqueamento (e os motivos pelos quais não foram considerados). Esta parte não será detalhada em mais profundidade pois depende da implementação computacional, que está fora do escopo deste trabalho. Definir-se-á, apenas, que informações deverão ser mostradas ao usuário.

3.2.4.1 Ranking dos componentes selecionados

O ranking de componentes selecionados apresenta, ao projetista, uma lista dos componentes capazes de satisfazerem os requisitos de aplicação, classificando-os daquele que melhor atende a esses requisitos àquele que pior os atende. Além disso,

considera-se, no ranqueamento, a compatibilidade das interfaces, que acarretam em custos de fabricação e logísticos.

3.2.4.2 Listagem dos componentes excluídos

O SE também deve listar, na interface de saída, os componentes que não podem ser usados. Além disso, mostra os motivos pelos quais tais componentes não podem ser usados no projeto, auxiliando o projetista a adquirir um melhor conhecimento sobre o domínio do projeto em que atua.

3.2.4.3 Descrição dos atributos e características de aplicação

A interface de saída também disponibiliza os atributos e características de aplicação de todos os componentes ranqueados. O projetista pode, portanto, analisar tais informações, aperfeiçoando seu conhecimento sobre a aplicação de tais componentes.

3.2.4.4 Requisitos de interfaces

O SE mostra, quando não houver compatibilidade total entre o componente selecionado e a peça na qual ele irá se acoplar, os requisitos necessários para que o acoplamento ocorra. Ou seja, o SE apresenta quais os requisitos que as interfaces do componente exigem das interfaces da peça para que ocorra uma montagem perfeita. Tal informação orienta o projetista em relação ao tipo de processo de fabricação que a peça deve ser submetida para ser acoplada ao componente selecionado.

3.2.4.5 Alternativa de melhor conjunto

O SE também tem a capacidade de ranquear não apenas componentes, mas conjuntos de componentes que atendam aos requisitos de projeto. Na interface de saída, portanto, os conjuntos selecionados também são ranqueados, permitindo a visualização de todos os componentes que compõem cada conjunto (e suas respectivas características).

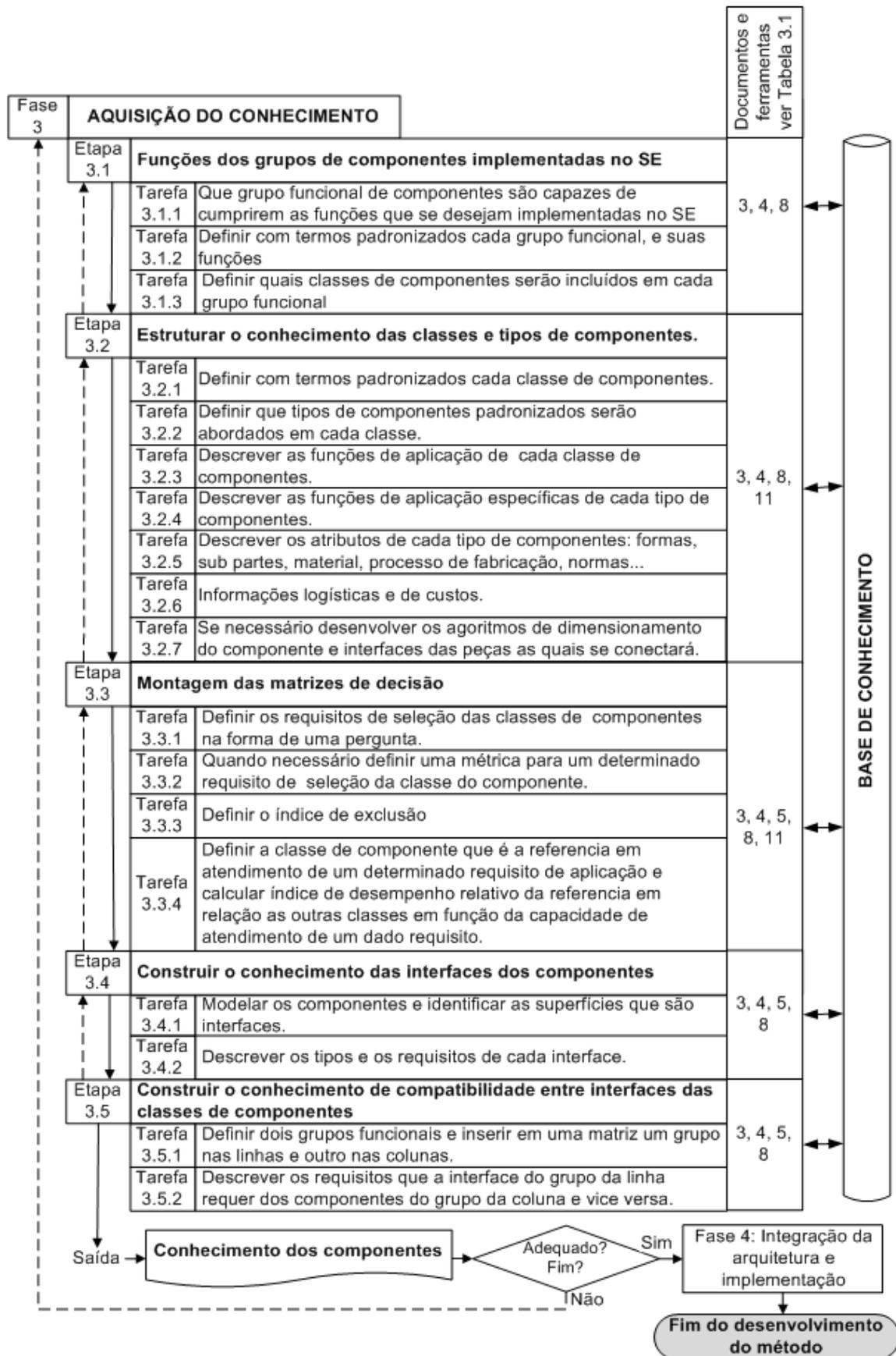
3.3 Fase 3: Aquisição do Conhecimento

Nesta fase, será desenvolvido o conhecimento sobre os componentes que ficarão armazenados na base de conhecimento do SE. Assim, quando este deseja fazer uma seleção, recorre às informações contidas nas matrizes de decisão e, quando for necessário considerar os aspectos das interfaces, as informações são buscadas nas matrizes de dependência que contém as informações de compatibilidade das interfaces.

O processo de aquisição do conhecimento é considerado o desafio mais difícil para se desenvolver um sistema especialista. A qualidade dos resultados do processo de seleção obtida do SE depende da qualidade do conhecimento adquirido. O conhecimento do especialista é mais difícil e mais complexo para se adquirir e empregar para o desenvolvimento de um SE do que a informação de fontes documentadas. A fim de expressar esta informação, é necessário recorrer à formulação de condições "heurísticas". Quanto mais heurístico o conhecimento, mais complexo se torna o processo de aquisição.

Segundo Finguer e Dixon (1989) um modelo de sistema especialista é baseado na observação de como os seres humanos pensam quando da execução de determinada tarefa. A sequência de atividades necessárias para a aquisição e estruturação do conhecimento é mostrada no fluxograma da Figura 3-6. A seguir serão detalhadas as atividades desenvolvidas em cada etapa e as tarefas pertinentes.

Figura 3-6: Fluxograma para a aquisição do conhecimento



Fonte: Própria

3.3.1 Funções dos grupos de componentes implementados no SE

Esta etapa é responsável pela estruturação básica dos principais recursos que o SE disponibilizará aos usuários. Serão determinadas as classes de componentes que serão incluídos em cada grupo funcional e suas definições.

3.3.1.1 Definição dos grupos funcionais implementados no SE

Esta etapa define para quais funções o SE irá selecionar componentes, sendo oriunda do processo de engenharia de requisitos e da experiência do especialista. Diferentes domínios possuem diferentes funções que seus componentes devem desempenhar. A partir destas funções, serão definidas todas as classes e tipos de componentes selecionados pelo SE.

3.3.1.2 Definir com termos padronizados cada grupo funcional e suas funções

Isto é feito usando se a taxonomia, e tem por objetivo a padronização dos termos usados, de maneira que possa ser compartilhada e aproveitada por outras equipes, possibilitando que o trabalho possa ser realizado em paralelo sem que haja problemas de entendimento devido à falta de padronização semântica. Definições corretas e bem fundamentadas permitem que as funções dos componentes dos grupos sejam claramente entendidas. Isto evita uma série de erros, como inserir certas classes de componentes em grupos aos quais não pertencem.

3.3.1.3 Definir quais classes de componentes serão incluídos em cada grupo funcional

Estas definições dependem totalmente do domínio para o qual o SE está sendo desenvolvido, mesmo que seja somente para componentes mecânicos, já que algumas classes de componentes podem, ou não, ser utilizadas. Assim, o especialista deverá, baseando-se em sua experiência e nas necessidades do domínio e dos clientes, incluir as classes necessárias para que o processo de seleção seja eficiente e abrangente.

3.3.2 Estruturar o conhecimento das classes e tipos de componentes

Neste trabalho o domínio de componentes mecânicos foi decomposto em diferentes grupos funcionais, para diferentes funções. Assim, serão agregados em um grupo aqueles componentes capazes de desempenhar a função estabelecida para este grupo por meio da definição que foi estabelecida. Por exemplo, no grupo transmissão de potência, os componentes que são usados para este fim são correias, correntes, engrenagens entre outros. Este grupo funcional deverá, no entanto, ser subdividido em classes de componentes que transferem a potência por princípios de funcionamento diferente. Assim, por exemplo, os componentes rígidos que trabalham por princípio de engrenamento pertencerão à classe das engrenagens. As diferentes classes são constituídas de diferentes tipos de componentes com a mesma função e princípio de funcionamento, por exemplo, a classe das engrenagens pode ser dividida em engrenagens de dente reto e helicoidais.

As relações hierárquicas são listadas das mais gerais para as mais específicas. A nível de componente específico, de forma a prover todas as informações a respeito deste componente, como: definição, descrição das funções, material do qual é feito, o processo de fabricação, normas, características de aplicação entre outros atributos.

3.3.2.1 Definir com termos padronizados cada classe e tipo de componentes

Para que haja uma padronização na semântica usada pelos projetistas, ou seja, um padrão de nomes para os componentes, será usado o padrão definido por Gree *et al* (2003), que definiu 114 nomes de componentes mecânicos básicos, seus sinônimos e definições. Isto é fundamental para não haver problemas de comunicação entre os projetistas, principalmente os de diferentes locais que usarão o SE. Além disso, a taxonomia usada para este SE pode ser aplicada pelo engenheiro de conhecimento para outros domínios por meio de outras equipes de desenvolvimento. Outro aspecto é a possibilidade de integração e comunicação desta ferramenta com outras, como catálogos eletrônicos e ferramentas de dimensionamento, entre outras.

3.3.2.2 Definir os tipos de componentes que comporão cada classe

Esta definição é proveniente dos requisitos dos clientes que, transformados em especificações, determinam os componentes das classes. Um leque maior de tipos de componentes dá ao usuário do SE mais opções de escolhas. Porém, o especialista deve ter o cuidado de observar que, em determinados domínios, não são usados certos tipos de componentes. A não observância disto apenas gera custos de implementação com recursos que podem não ser usados.

3.3.2.3 Descrição das funções de aplicação das classes

O objetivo desta descrição é orientar os projetistas com relação às classes. Por exemplo, o grupo funcional de transmissão de potência possui várias classes de componentes com diferentes princípios de funcionamento. Nas correias sincronizadas, o princípio de funcionamento de é o sincronismo entre os eixos, e isto vale para todos os tipos de correias sincronizadas pertencentes a esta classe. Esta estruturação com conceitos, definições e princípios de aplicação, bem organizadas em grupos funcionais, classes e tipos, é especialmente útil quando se estrutura uma base de dados.

3.3.2.4 Descrever as funções de aplicação específicas de cada tipo de componente

O objetivo desta descrição é orientar os projetistas que estão usando o SE em relação aos tipos de componente pertencentes à determinada classe. Assim, o projetista menos experiente poderá conhecer detalhadamente aspectos como características, recomendações e restrições de aplicação para um componente específico. Através dessa descrição, o projetista pode, por exemplo, conhecer as diferentes características de aplicação de uma correia em V clássica, ou uma estreita. Isto o ajuda a ter um maior conhecimento sobre a aplicação do componente. O acesso a estas informações são independentes do processo de seleção, pois podem ser acessadas pelo projetista a medida que forem necessárias e ficam disponíveis na interface da saída. Algumas funções de aplicação são oriundas das Tabela 3-3 e Tabela 3-4, outras são obtidas diretamente dos catálogos, manuais de aplicação, literatura técnica e dos especialistas.

Tabela 3-3: Atributos dos componentes

Componente:	
Grupo funcional:	
Atributo:	Descrição do atributo

Fonte: Própria

Tabela 3-4: Matriz de decisão.

Grupo Funcional:				
	Requisito 1	Requisito 2	Requisito 3	Requisito j
Alternativa 1	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{1j}
Alternativa 2	X_{21}			
Alternativa 3	X_{31}			
Alternativa i	X_{i1}			X_{ij}

Fonte: Própria

3.3.2.5 Descrever os atributos de cada componente

O objetivo desta descrição é permitir que os projetistas possam conhecer certas características dos componentes como: suas características físicas (formas, partes e subpartes), o material do qual é feito, seu processo de fabricação, suas normas, entre outras. Estas informações estão fragmentadas em várias fontes e em vários formatos. Assim, para que possam ser agrupadas, faz-se o uso da Tabela 3-3. Alguns atributos são obtidos diretamente dos catálogos técnicos, manuais de aplicação, literatura, normas técnicas e dos especialistas.

3.3.2.6 Informações logísticas e de custos

Especialistas e projetistas, em geral, não possuem total conhecimento sobre as informações logísticas, comerciais e de custos sobre um determinado componente. Portanto, estas informações devem ser obtidas com o pessoal dos departamentos comerciais e/ou de vendas dos fornecedores, ou nas áreas de comércio dos sites dos fornecedores.

As informações de custos e logísticas também são inseridas na matriz de decisão padronizada, Tabela 3-4, onde haverá um critério específico para os aspectos logísticos e também de custos do componente.

3.3.2.7 Dimensionamento dos componentes e interfaces

Este método permite que o SE, além de selecionar os componentes, possa dimensionar as interfaces das peças nas quais os componentes selecionados irão se acoplar. Os procedimentos de cálculo para dimensionamento podem ser desenvolvidos para cada grupo funcional. Eles são específicos para cada componente, não havendo uma formulação genérica para se usar no método.

3.3.3 Construção das matrizes de decisão

As matrizes de decisão têm por objetivo organizar os índices de desempenho relativos entre componentes de um grupo de requisitos. Estas matrizes, geradas pelo especialista, são fornecidas para o engenheiro de software, que as insere em um banco de dados organizado no SE. A partir disso, uma ferramenta de decisão multicritério pode fazer o ranqueamento das alternativas possíveis de componentes para uma dada aplicação sob determinados requisitos.

As matrizes de decisão podem ser montadas por vários especialistas que possuem domínio do conhecimento de um determinado componente e/ou grupo funcional. Assim, este especialista irá inserir, nas linhas, as alternativas de componentes que possam cumprir a função deste grupo. Nas colunas, são inseridos todos os requisitos necessários para que o processo de seleção possa levar em conta todas as alternativas. Os requisitos de seleção serão vistos em mais detalhes na seção 3.3.3.1. Para cada um dos grupos funcionais de componentes presentes no SE, haverá uma matriz de decisão, como mostrado na Tabela 3-4.

O valor X_{ij} é o índice de desempenho relativo da i ésima alternativa para o j ésimo requisito, que representa um valor baseado em uma métrica que permite comparar as diversas alternativas em função dos requisitos a serem levados em conta no processo de seleção. A maneira de formalizar estes índices é descrita nas seções 3.3.3.3 e 3.3.3.4. No Apêndice B, são mostradas as matrizes de decisão dos seguintes grupos funcionais: eixos, fixação cubo-eixo, transmissões e mancais.

3.3.3.1 Definir os requisitos de seleção na forma de uma pergunta

Os requisitos de aplicação sempre são implementados na matriz de decisão na forma de perguntas, que são apresentadas ao projetista na interface de entrada. Desse modo, a implementação do SE se torna mais produtiva e evita-se que informações sejam perdidas, ou que o requisito seja mal interpretado pelo projetista.

Os requisitos de seleção são definidos pelo especialista baseados em sua experiência, em informações dos catálogos técnicos e manuais de aplicação e seleção dos fabricantes, em manuais e literatura técnica, etc. Tais informações são disponibilizadas de diferentes maneiras como tabelas, textos, gráficos, conhecimento dos especialistas, etc. Por outro lado, estas informações são apresentadas pelo SE por meio de conceitos, índices, perguntas, entre outras. Para que o processo de obtenção das informações dos requisitos fique mais objetivo é necessário adotar um padrão tanto da representação como da formatação das perguntas. Isto tornará o trabalho do engenheiro de conhecimento muito mais rápido e eficiente. Esta padronização também permite que diferentes especialistas possam implementar outros componentes, grupos funcionais ou domínios sem que haja retrabalhos.

Como exemplo de construção das perguntas dos requisitos de seleção, pode-se observar a Figura 3-7, na qual existem vários critérios de seleção para a classe de mancais de rolamento, como capacidade de carga radial, axial em ambas as direções, etc. Assim, o especialista pode transformar estes critérios em uma pergunta de um requisito de aplicação para a matriz de decisão, por exemplo, “*Qual a capacidade de carga radial?*”.

A Figura 3-7 mostra um exemplo onde os índices de desempenho são mostrados de forma gráfica. Já na Figura 3-8, os índices de desempenho são mostrados na forma de conceitos. Para a construção das matrizes de decisão, os especialistas devem transformar os conceitos, além de outras formas de representação, em índices, de forma que possam ser implantados na base de dados do SE.

Figura 3-7: Tipos construtivos e características de aplicação dos rolamentos

		Características			
		Capacidade de carga radial	Capacidade de carga axial em ambas as direções	Compensação linear dentro do rolamento	Compensação linear por ajuste livre
<p>● Aptidão muito boa</p> <p>◐ boa</p> <p>◑ normal/possível</p> <p>◒ com restrições</p> <p>○ impróprio</p>					
Topo construtivo					
fixo de esferas		◐	◑	○	◑
de contato angular de esferas		◐	◑ ↑	○	◑ a
de contato angular de esferas de duas carreiras		◐	◑	○	◑
para fusos		◐	◑ ↑	○	◑ a
de quatro pistas		◐	◑	○	○
autocompensador de esferas		◐	◑	○	◑
de rolos cilíndricos NU, N		●	○	●	○

Fonte: FAG (2015).

3.3.3.2 Definição de métricas para os requisitos de aplicação

Para alguns grupos funcionais, como mostrado na Figura 3-8, é necessário estabelecer, por meio de valores, conceitos como alta e baixa velocidade ou alta e baixa potência. Nesse caso, isto ajuda a definir que classe de componente é mais adequada para uma certa faixa de velocidade e potência. Assim, para verificar a viabilidade do ponto de vista de custo, é necessário relacionar o custo com velocidade e potência, o que gera uma unidade de medida como (R\$/CV/rpm). Assim, neste critério, cada classe de componente terá um valor de R\$/CV/rpm e, a classe que tiver a melhor relação R\$/CV/rpm será a de referência. Os índices de desempenho serão calculados pela equação 3.7, que sempre terá os índices de desempenho relativos ao componente de referência para que sejam inseridos na matriz de decisão.

Figura 3-8: Comparativo de diferentes tipos de classes de componentes do grupo funcional transmissão de potência

Tipo		Corrente de rolo	Correia sincronizada	Correia em V	Engrenagem
Sincronização		E	E	P	E
Eficiência da transmissão		E	E	F	E
Absorção de choques		F	B	E	P
Vibração / Ruído		F	B	E	P
Condição ambiente		Evitar agua e pó	Evitar agua, pó, óleos e temperatura.	Evitar agua, pó, óleos e temperatura.	Evitar agua e pó
Economia de espaço	Alta velocidade baixa carga	P	E	B	B
	Baixa velocidade alta carga	E	F polia pesada	P polia larga	B
Lubrificação		P requer	E não requer	E não requer	P requer
Flexibilidade de layout		E	B	F	P
Excesso de carga sobre o rolamento		E	F	P	E

E = Excelente **B** = Bom **F** = Fraco **P** = Pobre

Fonte: Tsubaki (2015).

De forma análoga, para que se possa definir, por exemplo, qual classe de componente é mais compacta (que tem menor largura), é necessário definir um procedimento com uma unidade específica para este propósito. Neste caso, para uma faixa de velocidade e potência, mantém-se um diâmetro constante (de uma polia, engrenagem ou pinhão) e calcula-se a capacidade de cavalos por rotação por mm de largura (CV/rpm/mm). Estes índices de desempenho também seguem o mesmo raciocínio que foi usado no cálculo para o custo.

Para que o SE possa funcionar de forma adequada e consiga produzir ótimos resultados no processo de seleção, é fundamental que, na matriz de decisão, os índices de desempenho sejam coerentes, que reflitam a realidade de forma proporcional, por meio de pesos relativos entre as opções para cada critério. Assim, são necessários valores baseados em dois tipos de índices, o índice de exclusão e o índice de desempenho relativo, que serão vistos a seguir.

3.3.3.3 Índice de exclusão

O índice de exclusão é atribuído a um componente quando este não atende a um determinado critério imprescindível da aplicação, fazendo com que não possa ser usado. Este componente deve, portanto, ser excluído do ranking de opções de seleção. Por exemplo, na Figura 3-8, o critério de lubrificação para correntes e engrenagens recebem o valor de índice igual a 0, pois não podem trabalhar sem lubrificação, enquanto as correias recebem o valor de índice igual a 10, pois atendem plenamente este critério. O SE irá interpretar este valor 0 como um componente que não poderá ser selecionado, portanto é excluído das opções de seleção.

3.3.3.4 Definir a classe de componente referência para um determinado requisito de aplicação e calcular o índice de desempenho relativo

Para tornar este tópico mais claro, será feito o uso de um exemplo de preenchimento de uma matriz de decisão. Tomando como base a Figura 3-7, sobre os tipos construtivos e características de aplicação dos rolamentos, será preenchida a matriz com índices que expressam a capacidade de cada tipo de rolamento de satisfazer cada requisito, como é mostrado na Tabela 3-5.

Como pode ser observado, os índices de cada rolamento em relação aos requisitos foram preenchidos baseados em uma tabela de um fabricante (os símbolos usados pelo fabricante foram transformados em valores pelo especialista), para que o componente de referência possa ser encontrado e, a partir dele, possam ser calculados os índices de desempenho relativos. Na capacidade de carga radial, para os rolamentos apresentados, o de rolos é o que melhor atende este requisito específico em função de ter o melhor índice de desempenho I_R . Assim, neste caso, os rolamentos de rolo serão os componentes de referência para este requisito. No caso da capacidade de carga axial, os componentes de referência serão os rolamentos de contato angular e os de quatro pistas, já que possuem os maiores índices.

Tabela 3-5: Exemplo de matriz de decisão com índices de desempenho

	Capacidade de carga radial	Capacidade de carga axial
Fixo de esferas	7,5	5
Contato angular de esferas	7,5	7,5
De quatro pistas	2,5	7,5
Autocompensador de esferas	7,5	2,5
De rolos cilíndricos NU, N	10	0

Fonte: Própria

Os índices de desempenho relativo são usados por um método multicritério presente no SE para ranquear as alternativas em relação a um determinado critério. O ranqueamento exhibe os componentes em ordem, daquele que melhor atende ao critério para aquele que pior o atende. Este índice é calculado com base no componente que tem o melhor desempenho para este critério, ou seja, a alternativa de referência. Para que haja uma padronização nos valores dos índices de desempenho de um dado critério, estes são calculados pela equação 3.7.

$$IR_i = \frac{I_i}{I_R} \times 10 \quad (3.7)$$

Onde:

IR_i = índice de desempenho relativo da $i^{\text{ésima}}$ alternativa em relação a alternativa de referência para um dado critério;

I_i = índice de desempenho da $i^{\text{ésima}}$ alternativa para um dado critério;

I_R = índice de desempenho que é a referência de um conjunto de i alternativas para um dado critério;

O índice de desempenho relativo tem seu valor multiplicado por 10 para que se torne mais intuitivo e haja uma melhor percepção de seus valores. A seguir é mostrada uma escala com valores arbitrados para este SE que indicam a capacidade de um componente atender um determinado critério:

$1 \leq IR_i < 4$ = Fraco: a alternativa atende precariamente ao critério de aplicação;

$4 \leq IR_i < 6$ = Regular: a alternativa atende parcialmente ao critério de aplicação;

$6 \leq IR_i < 8 = \text{Bom}$: a alternativa atende ao critério de aplicação;

$8 \leq IR_i < 10 = \text{Excelente}$: a alternativa atende plenamente ao critério de aplicação sendo comparável a alternativa de referência.

Na Tabela 3-6, a equação 3.7 foi aplicada. Pode-se observar, em relação ao componente de referência, o quanto os outros são capazes de atender um determinado requisito. O componente de referência é aquele que apresenta o maior índice de desempenho. Por exemplo, o índice de desempenho relativo do rolamento fixo de esfera para a capacidade de carga axial é calculado pela equação 3.7 da seguinte forma: $IR_i = (5 / 7,5) * 10 = 6,7$. Os valores desta tabela são usados pelo SE para fazer o ranqueamento.

Tabela 3-6: Exemplo de matriz de decisão com índices de desempenho relativos para mancais de rolamento

	Capacidade de carga radial	Capacidade de carga axial
Fixo de esferas	7,5	6,7
Contato angular de esferas	7,5	10
De quatro pistas	2,5	10
Autocompensador de esferas	7,5	3,3
De rolos cilíndricos NU, N	10	0

Fonte: Própria

Este cálculo do índice de desempenho relativo é muito eficaz em casos como o das transmissões, em que é necessário recorrer a literatura técnica ou a outras fontes que possam fornecer os valores de eficiência para os componentes deste grupo funcional. Como pode ser observado, as correntes de rolos, correias sincronizadas e engrenagens são classificadas como excelentes em termos de eficiência, o que tornaria a decisão de seleção inconclusiva por este critério.

Valores não devem ser atribuídos sem que sejam embasados em dados confiáveis, pois podem induzir a erros de seleção, já que há diferenças pequenas de eficiência entre estes componentes (até mesmo da ordem de 1 a 5%). Esta diferença em um sistema de baixa potência tem um impacto pequeno, mas em sistemas de grande porte isto pode inviabilizar, do ponto de vista de custo operacional, a seleção

de um componente. Assim, este índice consegue estabelecer quais componentes atendem melhor um determinado critério, mesmo que as diferenças de valores dos critérios sejam pequenas.

3.3.4 Construir o conhecimento das interfaces dos componentes

O conhecimento sobre as interfaces, que são os requisitos das interfaces que um componente selecionado exige do outro ao qual vai se acoplar, é fundamental para a construção da base de conhecimento do SE. Quando for feito o processo de seleção, o SE irá usar este conhecimento para que possa apontar as melhores opções para o projetista, levando em conta a compatibilidade das interfaces entre peças e componentes que irão se acoplar. Este conhecimento também é usado pelo SE para que calcule o custo total de um componente, que compreende a soma de três custos: o do componente, o de fabricação envolvido na compatibilização das interfaces e o logístico. Assim, o SE poderá comparar qual a alternativa que, ao satisfazer os requisitos de aplicação, diretrizes de projeto e o custo total, é a mais indicada para a aplicação.

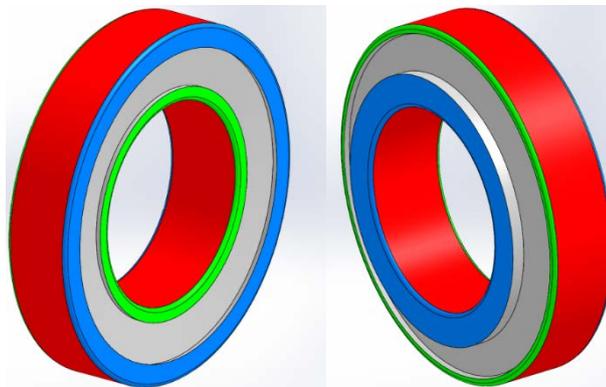
Para a aquisição do conhecimento sobre as interfaces, uma das ferramentas usadas é a taxonomia, que fornece um vocabulário e procedimentos padronizados para as definições de interface. Assim, supera-se a falta de uniformização na terminologia das interfaces e melhora o compartilhamento de informações entre os envolvidos na construção do SE. Quando todos aqueles que colaboram comprometem-se ao uso de uma taxonomia compartilhada, as especificações das interfaces fornecidas por eles são consistentes e podem ser gerenciadas por ferramentas de software.

Além disto, esta parte da aquisição de conhecimento também pode ser feita por diferentes equipes sem incorrer em problemas de incompatibilidade de informações das interfaces. Outro aspecto é a importância de definir as informações das interfaces de forma consistente, para que seja possível que as definições evoluam de forma contínua, pois com o avanço da tecnologia são desenvolvidos novos componentes e aplicações que exigem esta flexibilidade.

3.3.4.1 Modelagem e identificação das superfícies das interfaces

Para construir o conhecimento das interfaces, é necessário identificá-las em cada componente. Esta é uma atividade feita manualmente pelo especialista que define cada feature que é uma interface, baseado no seu conhecimento empírico. Para isso, é usado um software de CAD 3D de forma que o componente seja modelado e, assim, o especialista consegue identificar todas as superfícies que possam ser interfaces. Um exemplo é mostrado na Figura 3-9, para um rolamento de rolo cônico no qual podem ser vistos ambos os lados do rolamento e as superfícies das interfaces.

Figura 3-9: Exemplo de superfícies que são interfaces de um rolamento de rolo cônico



Fonte: Própria

Os componentes são modelados de forma simplificada. No caso do rolamento mostrado, os rolos e a gaiola do rolamento não são modelados. Por convenção, todas as superfícies que não são interfaces sempre estarão na cor cinza. Cada uma das superfícies que são interfaces possuem uma cor específica para facilitar a sua identificação. Esta cor pode se repetir, porém duas interfaces que tem a mesma fronteira entre si sempre apresentarão cores diferentes uma da outra. O objetivo disso é deixar bem definida cada interface e suas delimitações. Isto pode ser observado no rolamento, no qual a interface do anel interno está em vermelho, enquanto que a interface do encosto do anel interno está em verde, de um lado, e azul, do outro.

Os componentes são formados por um conjunto de *features* que podem dar uma forma cilíndrica, prismática ou uma combinação de ambas a um componente. Os componentes de forma cilíndrica apresentam duas direções consideradas para as interfaces, a radial e a axial. Os componentes de forma prismática apresentam três direções consideradas para as interfaces, x, y e z. Quando há um fluxo de força e/ou

pressão em uma mesma direção, serão usados, de preferência, a mesma cor, mesmo que sejam interfaces diferentes. Por exemplo, no rolamento de rolo cônico, há duas forças, a radial que flui na direção radial entre a interface do anel interno e a interface do anel externo, ambas na cor vermelha. A força axial flui na direção axial, entre a interface do anel interno e a interface do anel externo, ambas na cor azul.

3.3.4.2 Requisitos das interfaces

Depois de identificar as interfaces, pode-se tipificar e definir suas funções de maneira que o processo de identificar seus requisitos se torne metódico, sistematizado e mais produtivo. Os principais tipos de interfaces são:

- Interface geométrica;
- Interface de energia;
- Interface de controle;
- Interface de dados.

Como neste trabalho estão sendo considerados apenas componentes mecânicos, apenas a interface geométrica será abordada dentre os tipos de interface existentes. Esta interface indica qual o requisito necessário para um componente ser fisicamente conectado a outro, o que está relacionado principalmente à geometria da interface definida no componente à base de *features* no modelo CAD, como mostrado na Figura 3-9.

Para os componentes mecânicos, as funções das interfaces são definidas em cinco tipos, que são descritos a seguir:

- Fornecer suporte;
- Transmitir força;
- Posicionar o componente na montagem;
- Providenciar a localização para outros componentes na montagem;
- Transmitir movimento.

Considerando o exemplo da Figura 3-9, as superfícies em vermelho são interfaces do tipo geométrica com função de suporte e de transmissão de força (no caso, força radial). As superfícies em azul são interfaces do tipo geométrica com função de

posicionamento e de transmissão de força (no caso, força axial). As verdes são interfaces do tipo geométrica com função apenas de posicionamento.

A identificação das interfaces e de suas funções torna o trabalho do especialista mais produtivo e confiável, contribuindo na descrição dos requisitos que cada uma destas interfaces requer do componente ao qual se acoplará. Como exemplo, no caso do rolamento de rolo cônico, a interface do anel interno em vermelho possui diversos requisitos que a superfície da interface do eixo onde se acoplará deverá atender, como: o eixo deverá ter uma rugosidade superficial igual ou melhor que 1,6Ra e tolerância dimensional, dependendo da aplicação, de j6 a r7, entre outras.

3.3.5 Construir o conhecimento de compatibilidade entre as interfaces

As informações de compatibilidade das interfaces de dois componentes que se acoplarão têm grande importância pelo fato de serem empíricas e não documentadas, sendo obtidas, em sua maioria, com os especialistas em aplicação dos componentes e projetistas. É uma atividade manual e depende totalmente do conhecimento e da experiência do especialista. Assim, estas informações de compatibilidade que compõem a base de conhecimento do SE para a seleção de componentes devem ser confiáveis e completas. Portanto, os especialistas precisam ter um método que os auxilie na transmissão desse conhecimento ao SE. O método proposto para a realização de tal tarefa é realizado em duas etapas, descritas a seguir.

3.3.5.1 Definir os grupos funcionais que se acoplarão e inseri-los em uma matriz de dependência

No método proposto, são montadas quantas matrizes forem necessárias para representar todas as possibilidades de combinação de montagem dos componentes dos grupos funcionais que estão sendo abordados no SE. Todas as matrizes usadas para a base de conhecimento do SE podem ser vistas no item 4.3.5.2. A forma de matriz facilita a visualização de todos os componentes de um grupo funcional que podem se acoplar com os do outro grupo funcional e reduz a possibilidade de que possa ser esquecida alguma combinação de componentes. A matriz é montada de modo a combinar componentes de dois grupos funcionais diferentes. Porém, podem haver combinações que não possuem matrizes de dependência, pois os grupos funcionais não são montados diretamente uns com os outros como, por exemplo,

rolamentos e componentes de fixação cubo-eixo. A Tabela 3-7 mostra parte de uma matriz de dependência dos grupos funcionais de eixos e fixação cubo-eixo.

Tabela 3-7: Matriz de dependência de eixos e fixação cubo-eixo

Matriz de dependência		
Grupos funcionais: Eixo x Fixação cubo eixo		
	Chaveta	Anel de fixação
Barra redonda laminada		
Barra redonda trefilada h11		

Fonte: Própria

Após todas as matrizes de dependência de um grupo funcional serem montadas, estas são transformadas em regras que definem o grau de compatibilidade entre as interfaces e seus requisitos. Estas regras são usadas especificamente para a seleção dos componentes deste grupo funcional. Assim, cada grupo funcional tem um conjunto de matrizes de dependência específicas que serão transformados em regras para auxiliar no processo de seleção dos componentes que fazem parte deste grupo.

3.3.5.2 Requisitos das interfaces que um grupo requer em relação a outro

Sempre que dois componentes são montados entre si, suas interfaces representarão a fronteira física entre eles. Para que estes componentes possam se acoplar, a interface de um gera um requisito na do outro ao qual será montado. Este requisito pode ser de compatibilidade total, parcial ou incompatibilidade. A compatibilidade total é quando um componente se acopla a outro sem a necessidade de nenhum processo de fabricação para tornar as interfaces compatíveis entre si, ou o uso de outro componente intermediário para tornar as interfaces possíveis de serem acopladas. A compatibilidade parcial ocorre quando uma ou mais interfaces da peça na qual o componente que está sendo selecionado irá se acoplar não atendem os requisitos da interface do componente, portanto para que as interfaces possam ser compatíveis, ou mais processos de fabricação são necessários para tornar as interfaces compatíveis entre si. A incompatibilidade total ocorre quando dois componentes não podem ser acoplados entre si, por exemplo, uma chaveta e um rolamento radial de esferas.

Depois de montar as matrizes, o especialista deverá analisar e descrever os requisitos das interfaces que um componente exige da interface do outro para todas

as combinações de componentes da matriz. Estes requisitos são preenchidos pelo especialista nas células da matriz de dependência como mostrado na Tabela 3-8, e são baseados em sua experiência, pois não existem informações na literatura que reúnem estes requisitos. Isto é feito para cada par de componentes (cada célula da matriz) dos grupos funcionais baseado principalmente no conhecimento do especialista, de casos de aplicações conhecidas, boas práticas de projeto, entre outras. Estas informações estão relacionadas à forma de aplicação dos componentes e dos requisitos de suas interfaces.

Na matriz, as células em amarelo representam componentes que tem compatibilidade parcial entre si, enquanto as verdes representam compatibilidade total. A notação *componente i > componente j* mostra o requisito que a interface do *componente i* exige da interface do componente *j* para que possam se acoplar por meio de suas interfaces. Na matriz, deve-se levar em consideração tanto os requisitos que a interface do componente *i* exige da interface do *componente j*, quanto os requisitos que a interface do *componente j* exige da interface do *componente i*, para que estes sejam acoplados.

Tabela 3-8 - Matriz de dependência de eixos e fixação cubo-eixo com os requisitos das interfaces

Matriz de dependência		
Grupos funcionais: Eixo x Fixação cubo eixo		
	Chaveta	Anel de fixação
Barra redonda laminada	<i>Chaveta > Barra redonda laminada:</i> Usinagem radial de precisão k7 ou melhor com rugosidade de 3,2Ra, e canal de chaveta com tolerância p9 com rugosidade de 3,2Ra no eixo.	<i>Anel de fixação > Barra redonda laminada:</i> Usinagem radial de precisão h11 ou melhor com rugosidade de 3,2Ra no eixo.
Barra redonda trefilada h11	<i>Chaveta > Barra redonda trefilada h11:</i> Usinagem radial de precisão k7 ou melhor com rugosidade de 3,2Ra, e canal de chaveta com tolerância p9 com rugosidade de 3,2Ra no eixo.	<i>Anel de fixação > Barra redonda trefilada h11:</i> Não é necessária nenhuma usinagem.

Fonte: Própria

Quando o especialista preencheu nas células da matriz de dependência a descrição dos requisitos das interfaces que um componente requer do outro, o engenheiro de software usará tais descrições para a montagem das regras que compõem a base de conhecimento do SE. Isto pode ser visto a seguir, sendo descritas duas regras baseadas na Tabela 3-8.

IF *chaveta > barra redonda laminada;*

AND eixo deve ter usinagem radial com precisão k7 ou melhor e rugosidade de 3,2Ra;

AND eixo deve ter usinagem do canal de chaveta com precisão p9 e rugosidade de 3,2Ra;

THEN existe compatibilidade parcial.

IF *Anel de fixação tipo > barra redonda trefilada h11;*

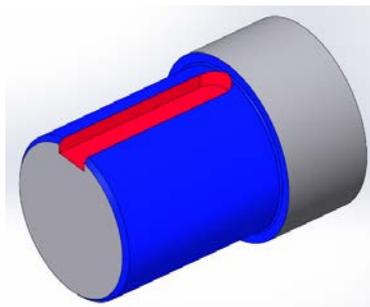
AND não é necessária nenhuma usinagem;

THEN existe compatibilidade total.

Estas regras permitem que o SE selecione um componente levando em consideração os requisitos das interfaces entre eles, indicando quando não é possível o acoplamento entre suas interfaces e mostrando o porquê da incompatibilidade. Em outros casos, o SE dá prioridade na seleção de um determinado componente em função de sua compatibilidade gerar economia nos processos de fabricação, montagem, logística entre outros. Outra possibilidade é a compatibilidade parcial entre as interfaces, isto é, a interface do componente a ser selecionado exige, por exemplo, um processo de usinagem para tornar compatível a interface do componente ou peça onde o componente a ser selecionado se acoplará.

Os componentes mecânicos que são selecionados pelo SE são montados em peças, que são fabricadas especificamente para projetos como: carcaças, bases, estruturas, entre outras. Porém, para que os componentes possam se acoplar a estas peças, eles precisam atender a certos requisitos. Tomando como exemplo a Tabela 3-7, a chaveta exige duas *features* para ser montada em uma barra trefilada. A primeira é uma usinagem radial de precisão, na cor azul, e a segunda é o rasgo de chaveta, na cor vermelha, mostradas na Figura 3-10.

Figura 3-10: *Features* necessárias na barra trefilada para acomodar a chaveta



Fonte: Própria

Os requisitos da interface da chaveta exigem duas *features* que geram dois processos de usinagem no eixo, que por sua vez irá influenciar nos recursos de fabricação necessários à sua produção e, em muitos casos, na logística que envolve esta fabricação se os recursos de usinagem não estiverem presentes na fábrica. Os conhecimentos destes requisitos estão definidos na matriz de dependência.

Quando o projetista responde, na tela de entrada, às perguntas necessárias ao dimensionamento dos componentes e de suas interfaces, o SE sabe as dimensões necessárias que a peça deve ter e, conseqüentemente, pode calcular o volume de usinagem de cada *feature*, para tornar a interface da peça compatível. Assim, o SE sabe as dimensões necessárias que a peça deve ter e, conseqüentemente, pode calcular o volume de usinagem de cada *feature*, para tornar a interface da peça compatível. Desta forma, o SE pode estimar o custo de fabricação da interface da peça multiplicando o volume da *feature* (mm^3) pelo custo por volume ($\text{R\$/mm}^3$) para cada *feature* presente no banco de dados do SE. O custo por volume das *features* leva em conta o tipo de processo de fabricação, sua precisão, o tamanho da peça e o material. De acordo com o tipo de processo a ser executado, também é possível saber se ele poderá ser feito dentro da fábrica ou deverá ser terceirizado. Caso seja terceirizado, o SE poderá estimar o custo logístico para este processo de fabricação.

3.4 Base de Conhecimento

A base de conhecimento é montada pelo engenheiro de software a partir das informações contidas nas matrizes de decisão (Tabela 3-4) e das informações contidas nas matrizes de dependência (Tabela 3-7). Estas informações são usadas para a criação das regras da base de conhecimento. Neste trabalho, a representação usando regras do tipo IF/AND/THEN (se/e/então) é escolhida por causa de sua clareza e objetividade em expressar condições, similar à forma de pensar do especialista, e a similaridade de como a máquina de inferência do SE trabalha. Além disto, são usadas as informações dos atributos obtidos com a Tabela 3-3, que também servem para gerar as informações da interface de saída.

O mecanismo de inferência para determinar se uma alternativa de componente X é a mais apropriada dentro de um grupo funcional Y pode ser resumida pela seguinte regra mestre:

IF um componente X de um grupo funcional Y for o mais adequado
AND todos os requisitos de aplicação que foram respondidos com valores entre 1 e 10 têm índice de desempenho diferente de zero
AND o componente atende aos requisitos de aplicação
AND as interfaces são dimensionalmente compatíveis
AND o custo do componente mais o custo de fabricação das interfaces mais o custo logístico é o mais baixo
THEN o componente X é o mais adequado.

Como cada grupo funcional tem uma estrutura com seu conjunto específico de regras para cada par de componentes que podem ser acoplados, a combinação desses pares é mostrada na matriz de dependência, e isso acontece por que:

- Estes grupos têm o seu próprio conjunto de requisitos de aplicação;
- Eles têm componentes específicos, que se conectam somente com outros componentes específicos de diferentes grupos;
- Os requisitos de interface de cada combinação de componentes são específicos.

Parte das regras do grupo de fixação de cubo-eixo é mostrada abaixo, como exemplo. São mostradas as regras de duas combinações de componentes, a primeira entre um anel de fixação e uma barra retificada, e a segunda entre uma chaveta e uma barra laminada. Como é possível perceber, estas regras são específicas para o acoplamento entre dois componentes e descrevem os requisitos que a interface do que se pretende selecionar requer daquele no qual será acoplado. Essas combinações são mostradas na matriz de dependência Tabela 3-8 e os requisitos das regras são extraídos das descrições de cada combinação de componentes.

3.5 Análise comparativa entre os diversos SE apresentados nas referências bibliográficas e o proposto neste trabalho

A Tabela 3-9 tem como objetivo mostrar as principais diferenças entre os métodos apresentados pelos diversos autores citados na revisão bibliográfica e o método proposto neste trabalho. Esta tabela mostra a abrangência do processo de seleção dos métodos pesquisados e quais ferramentas e técnicas foram usadas para cumprir este objetivo. Para isso, foram analisados os onze trabalhos mais representativos para

seleção de diferentes componentes, materiais e processos. Com a elaboração desta análise, pode-se concluir que:

- O ponto de partida do método proposto tem como base a possibilidade de selecionar os componentes de diferentes grupos funcionais para determinados domínios. Um dos principais recursos desta proposta é a possibilidade de levar em conta, no processo de seleção, os requisitos das interfaces entre os componentes que se acoplarão por meio de regras construídas a partir da combinação dos componentes inseridos em uma matriz de dependência. O SE proposto também analisa os recursos necessários para tornar uma interface compatível e calcula este custo de compatibilização, mais o custo do componente, de forma a compará-lo com o custo de componentes que tem as interfaces totalmente compatíveis. Quando os recursos para tornar uma interface compatível não estão presentes na fábrica, o SE também considera os custos logísticos para a terceirização deste processo. Conforme pode ser visto na Tabela 4.7, os artigos analisados nesta tese não aplicam estas técnicas e nem possuem estes recursos.
- Os SE propostos por Motz e Haghghi (1991), Perzyk e Meftah (1997), Ferguson, *et al* (1999), Ir e Dias (2000) levam em consideração, no processo de seleção, as metodologias DFX, nestes casos principalmente DFM, DFA e DFC. Estas diretrizes são as mesmas para todos os componentes de um projeto, e definem o que será priorizado no processo de seleção.
- Os configuradores, como os desenvolvidos por Tucho *et al* (2003) e Ferguson *et al* (1999), são SE baseados em um *shell*, integrados a bancos de dados, e usando regras, porém limitam-se a selecionar os componentes apenas para um produto específico.
- Os SE apresentados por Motz e Haghghi (1991), Ahluwalia *et al* (1993), Ferguson, *et al* (1999), Tucho *et al* (2003) e Gates (2014) além de selecionarem certos tipos específicos de componentes, também fazem seu dimensionamento.
- Os métodos multicritérios têm sido cada vez mais empregados para o auxílio da seleção de componentes em SE para o ranqueamento das alternativas, principalmente onde existem muitas alternativas que devem satisfazer um grande número de critérios, como nos trabalhos de Ahluwalia *et al* (1993) e Watanabe *et al* (2011), e também na seleção de materiais e/ou processos, como em Ashby *et al* (2003), Perzyk e Meftah (1997) e Luo *et al* (2010).

Tabela 3-9: Comparação entre diversos SE para a seleção de materiais, processos e componentes.

Autores	Tipo de seleção				Ferramentas e métodos utilizados no SE								
	Configurador	Componente específico ou classe	Vários grupos funcionais	Materiais / processos	DFX	Logística	Estrutura de componentes	Compatibilidade de interfaces	Matriz de dependência	Shell baseado em Regras	Dimensionamento dos componentes	MCDM	Custo de compatibilização das interfaces
Motz e Haghghi, 1991		X			X						X		
Sim e Chan, 1991		X					X						
Ahluwalia, <i>et al</i> , 1993		X									X	X	
Perzyk e Meftah, 1997				X	X							X	
Ferguson, <i>et al</i> 1999	X				X		X				X		
Er e Dias, 2000				X	X					X			
Ashby <i>et al</i> , 2003				X			X					X	
Tucho <i>et al</i> , 2003	X						X				X		
Mok <i>et al</i> , 2006				X						X			
Luo <i>et al</i> , 2010				X						X		X	
Watanabe <i>et al</i> , 2011		X					X					X	
Gates, 2014		X									X		
Weber, 2017			X		X	X	X	X	X	X	X	X	X

Fonte: Própria

3.6 Principais inovações e contribuições do método proposto

As principais inovações do método proposto neste trabalho de Doutorado são:

- O trabalho apresentado difere dos existentes pesquisado na literatura pelo fato de ser um método para o desenvolvimento da base de conhecimento de um SE para a seleção de componentes mecânicos que, além de levar em consideração os requisitos de aplicação, também é pioneiro por considerar os requisitos das interfaces dos componentes nos quais aquele selecionado irá se acoplar.
- O fato deste método fazer o SE considerar os requisitos das interfaces dos componentes torna o seu processo de seleção mais preciso e abrangente que os até então desenvolvidos. Como os SEs vistos na literatura não levam em conta estes requisitos, não consideram alternativas de componentes mais caros, como mais viáveis que outro mais barato, que podem exigir compatibilização das interfaces. Desta forma é comum selecionarem alternativas menos viáveis por não considerar os custos de fabricação e, eventualmente os logísticos como esta proposta.
- O método proposto considera no processo de seleção as diretrizes de projeto DFX, neste caso DFM, DFA e DFC. Assim, pode-se priorizar, no projeto, certas diretrizes por meio de pesos que irão influenciar no ranqueamento pelo método multicritério.
- Este método também é pioneiro por fazer com que o SE faça a seleção de componentes levando em conta os recursos de fabricação da planta onde o produto será produzido e a capacidade de suas máquinas, que realizam o processo de fabricação para compatibilizar as interfaces.
- Esta proposta é inovadora por calcular o custo de compatibilização das interfaces dos componentes por meio da estimativa da soma do custo de usinagem de cada *feature* necessária para compatibilizar a interface. Quando um componente é ranqueado, o SE conhece, por meio das informações da matriz de dependência que foram inseridas em sua base de dados, os requisitos do processo de fabricação para tornar a interface compatível. Com as informações inseridas pelo projetista, o SE calcula o volume de usinagem (mm^3) de cada *feature* que é multiplicado pelo custo de usinagem (R\$/ mm^3) de cada tipo de *feature* presente na base de dados

do SE e, quando necessário, é incluído o custo de *setup*. Assim, o custo de usinagem das *features* pode ser calculado. Caso o SE detecte que um determinado recurso de fabricação não existe na fábrica, ou quando este não possui capacidade em relação ao tamanho da peça a ser usinada; o SE calcula o custo logístico para o transporte dos componentes que necessitam um processo de fabricação indisponível na fábrica. Este cálculo é feito usando tabelas com o custo de frete em (R\$/kg/km), presentes na base de dados do SE, multiplicado pelo peso da peça e pela distância (ida e volta), em quilômetros, informada pelo projetista para o transporte dos componentes à outra fábrica.

- O processo de seleção deste SE é composto das seguintes etapas: eliminação dos componentes que são inviáveis para a aplicação, ranqueamento das alternativas por meio de um método multicritério e análise de compatibilidade das interfaces.
- Foi desenvolvido um novo método para comparar as alternativas, do ponto de vista do custo, considerando aquelas que tem interface totalmente compatíveis entre si, com as que demandam um processo de fabricação para a compatibilização (acarretando, ou não, em custo logístico).
- Um recurso que até então não foi observado em outros SE, porém que foi implementado nesta proposta, é que, além de dimensionar os componentes selecionados, também dimensiona o tamanho, isto é, as dimensões necessárias das interfaces da peça onde o componente selecionado irá se acoplará, tornando-os compatíveis.
- O método proposto usa uma matriz de decisão que possui índices de desempenho relativos entre componentes. Estes índices são usados por um método multicritério para fazer o ranqueamento das alternativas. Quando um índice tem valor zero, é automaticamente excluído por não atender um requisito de aplicação, não sendo ranqueado.
- Neste trabalho, foi desenvolvido um novo método aplicado a seleção de componentes, para a identificação das interfaces dos componentes e para a definição dos requisitos que estas interfaces exigem das peças nas quais os

componentes irão se conectar. Este conhecimento é obtido em três etapas principais:

1. Com a modelagem dos componentes usando ferramentas CAD 3D, são identificadas todas as interfaces e, na sequência, são feitas as descrições de todos os seus requisitos;
 2. É usada uma matriz de dependência, na qual as linhas contêm os componentes do grupo funcional do qual se está extraíndo o conhecimento, enquanto que as colunas contêm os componentes de outro grupo funcional que podem se acoplar aos componentes da linha. O número de matrizes de dependência depende da possibilidade de combinação dos componentes dos diferentes grupos funcionais;
 3. Em cada uma das células de cada matriz, é feita a descrição dos requisitos que a interface do componente da linha requer do componente da coluna, para que possam ser acoplados. Dessa forma, é possível saber o grau de compatibilidade entre suas interfaces e, além disso, o que é necessário fazer, do ponto de vista de processo de fabricação, para tornar as interfaces compatíveis.
- Os requisitos que a interface de um componente exige de outro, descritos na matriz de dependência, são transformados em regras para que o SE saiba se dois componentes têm interface totalmente compatível entre si. Caso sejam parcialmente compatíveis, o SE saberá que processos de fabricação são necessários à compatibilização das interfaces entre componentes, para que possam ser calculados os custos de fabricação.
 - O método proposto é apropriado para o desenvolvimento de um sistema especialista para a seleção de componentes de diversos grupos funcionais, podendo ser aplicado a diversos domínios que usem componentes mecânicos.
 - O método proposto permite melhorar a comunicação entre o engenheiro de conhecimento e o especialista, proporcionando uma transferência eficiente e de forma padronizada do repositório de conhecimento para a base de conhecimento do SE.

4 MONTAGEM DO SE NO DOMÍNIO DE APLICAÇÃO

Neste capítulo, o método proposto para o desenvolvimento da base de conhecimento e a sua implementação na máquina de inferência de um SE para a seleção de componentes mecânicos é implementado. Isto é necessário para que possa demonstrar a efetividade do método, e para isto será utilizado um domínio específico e com um número de funções limitado. A montagem segue as três fases principais definidas no capítulo 3, que são: especificação, arquitetura e aquisição do conhecimento.

4.1 Especificação do SE

A especificação deste SE foi feita a partir das informações obtidas com especialistas e projetistas que atuam nos domínios para os quais o SE é desenvolvido. Isto foi feito por meio de reuniões, a fim de conhecer que tipo de recursos e funcionalidades são desejadas num sistema destes. Além disso, as reuniões/entrevistas contribuíram para definir como e quais resultados o SE deve apresentar.

4.1.1 Identificar as necessidades dos clientes (nicho de mercado)

Esta etapa define o domínio e as funções que serão implementadas no SE.

4.1.1.1 Definir o tipo de SE a ser desenvolvido (domínio)

Os domínios de aplicação deste SE serão o projeto de máquinas de papel, têxtil, beneficiamento de madeira, alimentos e bebidas. A escolha destes domínios contemplando estas indústrias do setor de transformação deve-se a sua expressiva participação no produto interno bruto PIB, isto é, o SE a ser desenvolvido tem um grande potencial de mercado.

Segundo o DEPECON (2015) em 2013 a indústria de alimentos tinha uma participação de 15,2%, bebidas 3,2%, celulose, papel e produtos de papel 3,4%, produtos de madeira e móveis 2,9%, produtos têxteis 1,9%. Estes setores juntos representam 26,6% de participação no PIB das indústrias no setor de transformação, que precisa de máquinas e equipamentos para prover a produção. Isto faz com que haja uma grande diversidade de máquinas e equipamentos e, conseqüentemente,

uma grande demanda de projetos de desenvolvimento destes equipamentos, que precisam ter seus componentes selecionados de forma coerente de formar a tornar estas máquinas eficientes e competitivas.

4.1.1.2 Definir os tipos de função que SE deverá atender

Para esta aplicação as seguintes funções terão seus componentes selecionados: mancalização, transmissão de potência, incluindo eixos e fixação cubo-eixo. Estas funções são suficientes para demonstrar o processo de aquisição de conhecimento e o funcionamento do SE.

Neste SE os grupos funcionais de eixos, mancalização e transmissão de potência serão selecionados apenas em função dos requisitos de aplicação, não sendo feito o seu dimensionamento e o da interface da peça onde se acoplarão. Apenas o grupo funcional de fixação cubo-eixo será ranqueado em função dos requisitos de aplicação, e também do custo do componente, somado ao custo de fabricação necessário para compatibilizar as interfaces das peças onde se acoplarão, e o custo logístico quando aplicável. Além disto todos os componentes deste grupo funcional são dimensionados e também o tamanho da interface, isto é, as dimensões necessárias da interface na peça para que possam se acoplar.

4.1.2 Estabelecer os requisitos de projeto do SE

Nesta etapa são definidos:

- **Quem usará este SE:** projetistas (técnicos e engenheiros) com a atribuição de projetar e selecionar os componentes necessários que compõe o projeto em desenvolvimento.
- **Quando será usado:** nas fases de projeto preliminar e detalhado.
- **Como será usado:** na fase de projeto preliminar, quando o projetista precisa testar diferentes conjuntos (podem ter diferentes princípios de solução) com diferentes componentes e precisa verificar qual o componente ou conjunto mais viável do ponto de vista do critério de projeto que está sendo priorizado. Na fase de projeto detalhado, é usado para selecionar os componentes mais adequados que serão usados no projeto de acordo com as diretrizes do projeto.
- **Funcionalidades:**

- Selecionar componentes mecânicos, levando em consideração os requisitos das interfaces das peças nas quais o componente selecionado irá se acoplar.
- Capacidade de selecionar componentes que atendam diferentes funções dentro de um domínio;
- Quando necessário, dimensionar as alternativas possíveis dos componentes ranqueados;
- Fazer o ranqueamento das alternativas de componentes possíveis de serem usados, destacando aquelas que melhor atendam aos requisitos da aplicação;
- No processo de seleção serão levados em conta o custo de fabricação utilizado para executar as *features* que tornam a interface da peça compatível com o componente;
- Quando os recursos de fabricação para a compatibilização da interface não estiverem disponíveis, deverá ser levado em conta o custo logístico para a terceirização deste processo;
- Capacidade de selecionar os componentes que compõe um conjunto, e avaliar os conjuntos sob determinados critérios de projeto, apontando aquele que melhor satisfaz os requisitos da aplicação e também os critérios de projeto considerados;
- Apresentar as características de aplicação e atributos dos componentes ranqueados e do selecionado;
- Mostrar todos os componentes que não foram selecionados e o motivo;
- As informações de entrada devem ser objetivas, e rápidas de serem inseridas, pouca digitação.
- Facilidade de uso;
- Modularidade, no que tange a implementação de novas funções e para diferentes domínios.

4.1.3 Pesquisar e analisar os SE concorrentes

Nesta etapa é pesquisado se existem SE concorrentes, quais funções e recursos tem, como funciona, quais informações levam em conta no processo de seleção, quais informações são inseridas para iniciar o processo e quais as respostas que fornece. Isto é importante pois podem haver recursos e/ou boas ideias que podem ser usadas,

além do que estas informações servem também para que o desenvolvimento do SE possa ser feito de forma a ter uma vantagem competitiva frente aos concorrentes garantindo o êxito do projeto.

4.1.3.1 Analisar todas as características relevantes dos SE concorrentes

Nesta tarefa, uma pesquisa sobre outros SE já existentes no mercado é realizada, de modo a evidenciar quais suas principais características, funcionalidades e como satisfazem as necessidades dos clientes. Esta tarefa está detalhada na seção 2.10 desta tese.

4.1.3.2 Aplicar benchmarking nos SE concorrentes

Nesta tarefa, os SE concorrentes são analisados, evidenciando as suas funcionalidades, quais as ferramentas empregadas no processo de seleção e que tipo de seleção fazem. Isto pode ser visto em mais detalhes na seção 3.5 e na Tabela 3-9 deste trabalho.

O produto concorrente de referência é o SE proposto por (Ahluwalia, *et al*, 1993). Porém, este SE é bastante diferente da proposta deste trabalho, já que é utilizado para selecionar e dimensionar apenas um tipo de componente específico (rolamentos).

4.1.4 Estabelecer as especificações do SE

As especificações deste SE estão descritas nas seções 5.1.1 e 5.1.2 deste trabalho, de forma que o especialista e o engenheiro do conhecimento possam usá-las para o desenvolvimento e implementação do SE proposto.

4.2 Arquitetura do SE

Nesta seção, serão definidas as informações necessárias para que o engenheiro de conhecimento e/ou o de software possam fazer a implementação computacional deste SE.

4.2.1 Interface de entrada

Esta etapa da implementação do SE não será detalhada pois a mesma é abordada na seção 4.2.1 do método.

4.2.2 Módulo de seleção de componentes

Esta etapa da implementação do SE não será detalhada pois a mesma é abordada na seção 3.2.2 do método. Além disso, a Figura 3-4 mostra um fluxograma geral de como as interfaces e módulos do SE se comunicam, o que contribui para que o engenheiro de software entenda como é o funcionamento do SE, auxiliando-o no processo de programação da implementação.

4.2.3 Avaliação de conjuntos

Esta etapa da implementação do SE não será detalhada pois a mesma é abordada na seção 3.2.3 do método.

4.2.4 Interface de saída

Esta etapa da implementação do SE não será detalhada pois a mesma é abordada na seção 3.2.4 do método, onde é descrito as informações que serão mostradas, e será implementada pelo engenheiro de software.

4.3 Aquisição do Conhecimento

Esta é uma das mais importantes fases da construção do SE, na qual o conhecimento sobre os componentes, seus requisitos de aplicação e os requisitos de suas interfaces são coletados, organizados e estruturados por diversas ferramentas, de forma que possam compor a base de dados do SE.

4.3.1 Definições e classes de componentes dos grupos funcionais

Estas definições têm por objetivo estruturar o conhecimento, de forma padronizada, a respeito das funções das classes e grupos funcionais. Esta padronização contribui na construção das taxonomias de forma que possam ser reutilizadas, não gerem dificuldade de compreensão por erros semânticos.

4.3.1.1 Definições dos grupos funcionais

- **Mancalização:** este grupo tem a função de dar suporte a um eixo que pode estar em movimento rotativo contínuo ou intermitente. O eixo pode ser suportado em sua direção radial, axial ou ambas as direções.
- **Transmissão de potência:** este grupo tem a função de transmitir potência por meio de movimento rotativo e torque. Este movimento rotativo pode ser transferido com uma relação de transmissão unitária, isto é, a rotação não se altera, ou pode ser transferido com relação de transmissão de ampliação ou redução, na qual a rotação pode ser aumentada ou diminuída. A relação de transmissão pode ser dada pela divisão dos diâmetros primitivos de duas polias, ou o número de dentes de duas polias dentadas ou engrenagens.
- **Fixação cubo-eixo:** este grupo tem a função de restringir o movimento de rotação relativo entre um eixo e um cubo. Em muitos casos, componentes deste grupo também restringem o movimento axial entre ambos eixo e cubo.
- **Eixos:** este grupo pode exercer duas funções: estrutural, quando o carregamento é estático; ou transferir torque e potência, por meio de movimento rotativo.

4.3.1.2 Definição das classes de componentes pertencentes aos grupos funcionais

- **Mancalização:** será composta por duas classes de componentes, mancais de rolamento e deslizamento.
- **Transmissão de potência:** correntes, correias em V, correias micro V, correias sincronizadas, engrenagens e eixos.
- **Fixação cubo-eixo:** chavetas, buchas e anéis de fixação.
- **Eixos:** maciços e tubulares.

4.3.2 Estruturar o conhecimento das classes e tipos de componentes

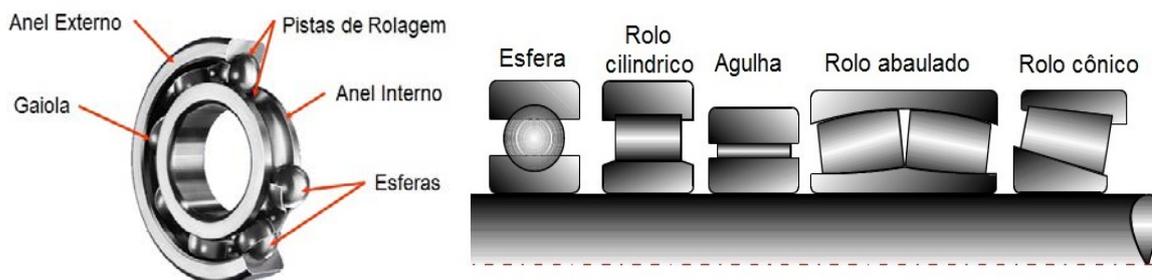
Este conhecimento é organizado na forma de uma estrutura, onde no nível mais alto temos o domínio componentes mecânicos, a seguir os grupos funcionais, as classes e por fim os tipos de componentes. Isto tem a finalidade de auxiliar o usuário no conhecimento da aplicação das diversas classes de componentes.

4.3.2.1 Definir as classes de componentes

Mancalização:

- **Mancal de rolamento:** mancal de contato de rolamento ou rolante, mais comumente conhecidos apenas por rolamentos, são usados para descrever a classe de mancal em que a carga principal é transferida por meio de elementos em contato rolante (SHIGLEY *et al* 2008). Neste SE, serão abordados apenas aqueles elementos com a função de suportar e fixar um eixo a uma estrutura, impedindo seus movimentos e permitindo apenas o movimento de giro em torno de sua própria linha de centro. Alguns tipos de rolamentos ou formas de montagem permitem um pequeno deslocamento axial com o objetivo de compensar a dilatação térmica. Alguns tipos de rolamentos permitem pequenos deslocamentos angulares geralmente menores que $2,5^\circ$ para compensar desalinhamentos entre os rolamentos de um eixo. Os rolamentos possuem um anel interno e outro externo, entre os quais está um conjunto de elementos rolantes que podem ter diferentes formas, como rolos, esferas ou agulhas. Os elementos rolantes estão separados por gaiolas que mantêm uma distância regular entre estes. Assim, quando um eixo está fixado no anel interno e começa a girar, sua carga passa para o anel interno do rolamento, sobre o qual rolam os elementos rolantes, que giram em sentido oposto ao do anel interno. Os elementos rolantes, por sua vez, rolam sobre o anel externo, transferindo a carga para o mesmo e para a estrutura onde se apoia o anel externo. A Figura 4-1 mostra os elementos de um mancal de rolamento, e os tipos de elementos rolantes mais comuns.

Figura 4-1: Elementos de um mancal de rolamento, e tipos de elementos rolantes



Fonte: Própria

- **Mancal de deslizamento:** mancal é definido como o suporte ou guia através do qual um componente móvel é situado em relação a outros componentes de um mecanismo. Mancal de deslizamento é aquele onde somente acontece atrito pelo movimento de deslizamento relativo entre o eixo e o mancal (NBR 4378:2015). Neste SE, serão abordados apenas os mancais de deslizamento padronizados de prateleira produzidos pelos fabricantes, pois este software e destina apenas a componentes padrão. Como componentes desta classe, tem-se as buchas estampadas (buchas de parede fina, obtidas da conformação de uma tira de material antifricção ou de um aço revestido de material antifricção, podendo ser flangeadas ou não), as arruelas de encosto (placas anulares destinadas a suportar apenas cargas axiais) e as buchas sólidas (constituídas de um único material) (NBR 4378:2015). Estas buchas podem ser feitas de material auto lubrificante ou podem ter insertos auto lubrificantes, podendo operar a seco ou lubrificadas. Tem a função de apoiar um eixo em uma estrutura, restringindo seus movimentos e permitindo apenas o movimento de giro com o deslizamento do eixo sobre a superfície interna da bucha e em torno de sua própria linha de centro, admitindo pequenos deslocamentos axiais com o objetivo de compensar a dilatação térmica. A Figura 4-2 mostra uma bucha que usa filme lubrificante, buchas de material auto lubrificante e uma montagem de bucha com filme lubrificante sobre um eixo.

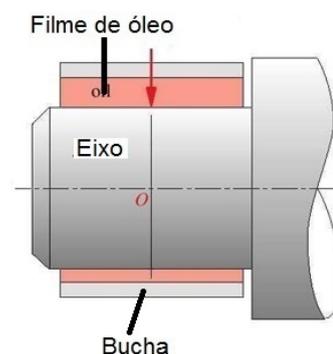
Figura 4-2: Bucha de deslizamento, bucha auto lubrificante e montagem de bucha sobre eixo



Bucha de deslizamento



Bucha auto lubrificante



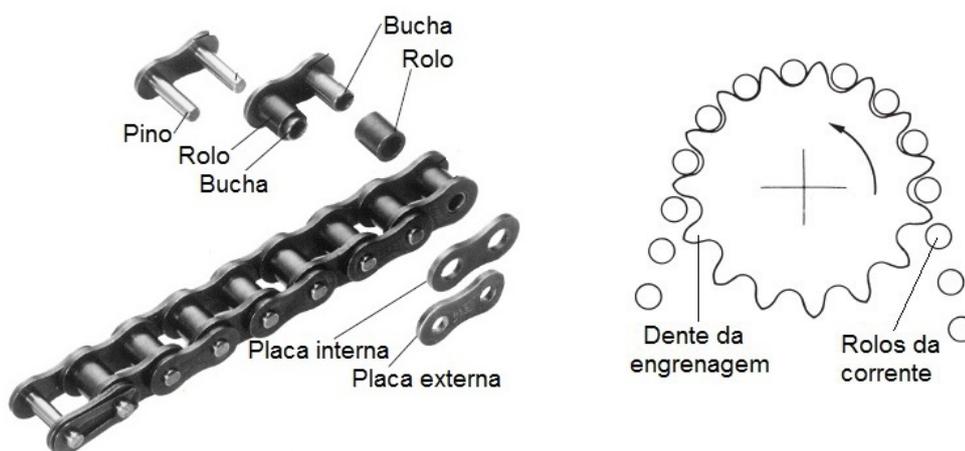
Montagem da bucha sobre eixo

Fonte: Própria

Transmissão de potência:

- **Correntes:** elemento de transmissão mecânica flexível, constituída por placas metálicas unidas por pinos e sobre estes são montadas as buchas sobre as quais giram os rolos (NBR 6390:1995). A corrente transfere potência da engrenagem motora para a movida. Os rolos da corrente se acoplam nos dentes da engrenagem motora, transformando o movimento rotativo e torque da engrenagem motora, transformando o movimento rotativo e torque da engrenagem motora em movimento linear e força na corrente, que novamente é transformado em movimento rotativo e torque na engrenagem movida por meio do engrenamento da corrente nesta engrenagem. A Figura 4-3 mostra os elementos de uma corrente de transmissão e o engrenamento dos rolos com os dentes da engrenagem.

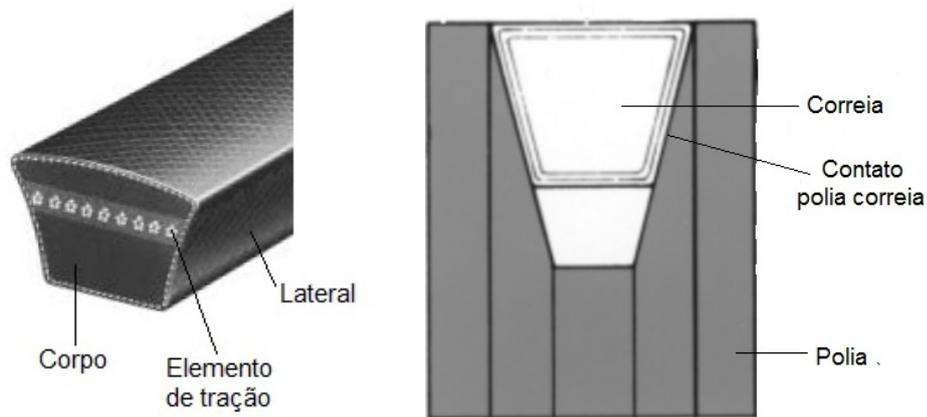
Figura 4-3: Elementos de uma corrente de transmissão e seu engrenamento na engrenagem



Fonte: Tsubaky, 2015

- **Correias em V:** é um elemento de transmissão mecânica flexível com seção transversal trapezoidal, usado para transferir potência entre dois ou mais eixos (NBR 14963:2012). A correia transfere potência do eixo motor para o movido por meio de polias montadas nos eixos, sobre as quais a correia se acopla pelo efeito cunha, gerando atrito e transferindo o movimento da polia para a correia e vice-versa. É uma transmissão onde não há sincronismo entre os eixos, devido ao escorregamento entre a polia e correia. A Figura 4-4 mostra os elementos de uma correia de transmissão em V e o seu acoplamento na polia.

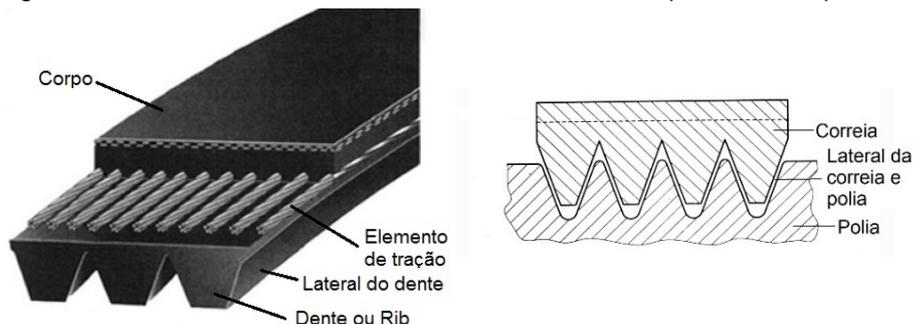
Figura 4-4: Elementos de uma correia em V e seu acoplamento na polia



Fonte: Gates, 2015

- **Correias micro V:** elemento de transmissão mecânica flexível com seção transversal constituída de múltiplos perfis trapezoidais unidos por uma estrutura em sua parte superior, usada para transferir potência entre dois ou mais eixos (NBR 15177:2013). A correia transfere potência do eixo motor para o movido por meio de polias montadas nos eixos, sobre as quais a correia se acopla pelo efeito cunha, gerando atrito e transferindo o movimento da polia para a correia e vice-versa. É uma transmissão onde não há sincronismo entre os eixos, devido ao escorregamento entre a polia e correia. A Figura 4-5 mostra os elementos de uma correia de transmissão micro V e o seu acoplamento na polia.

Figura 4-5: Elementos de uma correia micro V e seu acoplamento na polia

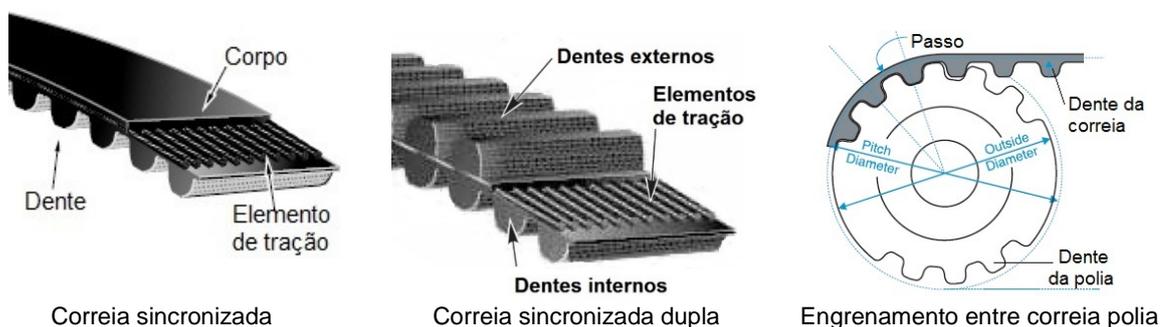


Fonte: Gates, 2015

- **Correias sincronizadas:** elemento de transmissão mecânica flexível, constituído de um corpo com denteado perpendicular à circunferência da correia destinado a transferir potência entre dois ou mais eixos, mantendo o sincronismo entre eles. O denteado pode ser apenas na circunferência interna ou tanto na interna quanto na externa. A correia sincronizada transfere potência

do eixo motor para o movido por meio de polias fixadas aos eixos, sobre as quais a correia se acopla. Os dentes da correia se acoplam aos dentes da polia motora, transformando o movimento rotativo e torque da polia motora em movimento linear e força na correia, que novamente é transformado em movimento rotativo e torque na polia movida por meio do engrenamento da correia nesta polia. A Figura 4-6 mostra os elementos de uma correia sincronizada e seu acoplamento com os dentes da polia.

Figura 4-6: Elementos de uma correia sincronizada e seu engrenamento na polia



Fonte: Gates, 2015

- **Engrenagens:** elemento de transmissão mecânica rígido, utilizado para transmitir potência entre dois eixos (SHIGLEY *et al* 2008). A transferência de potência da engrenagem motora, conhecida também como pinhão, é dado pelo princípio de engrenamento: seus dentes se acoplam com os dentes da engrenagem movida, exercendo pressão e movimento de deslizamento sobre os dentes da engrenagem movida, o que provoca nesta engrenagem um movimento de rotação em sentido contrário ao da engrenagem motora. O par coroa e “sem fim” tem um princípio diferente, já que a parte motora é um parafuso com perfil de rosca, que pode ter uma ou mais entradas. O “sem fim” se acopla a uma coroa, que é a engrenagem movida. Quando o parafuso gira, gera um movimento em sua rosca na direção axial, promovendo movimento rotativo e torque na coroa. A Figura 4-7 mostra um par de engrenagens helicoidais, cônica de dente reto e coroa e “sem fim”.

Figura 4-7: Engrenagem helicoidal, cônica de dentes retos e coroa e sem fim



Engrenagem helicoidal

Engrenagem cônica de dente reto

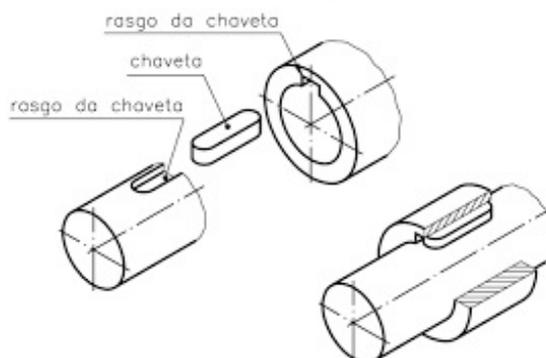
Coroa e sem fim

Fonte: Própria

Fixação cubo-eixo:

- **Chaveta:** elemento de fixação cubo-eixo que impede o movimento relativo de rotação entre o cubo e o eixo. Para isto, a chaveta é alojada em um canal existente tanto no cubo como no eixo. A Figura 4-8 mostra uma chaveta com sua montagem em um eixo e cubo.

Figura 4-8: Chaveta com sua montagem em um eixo e cubo

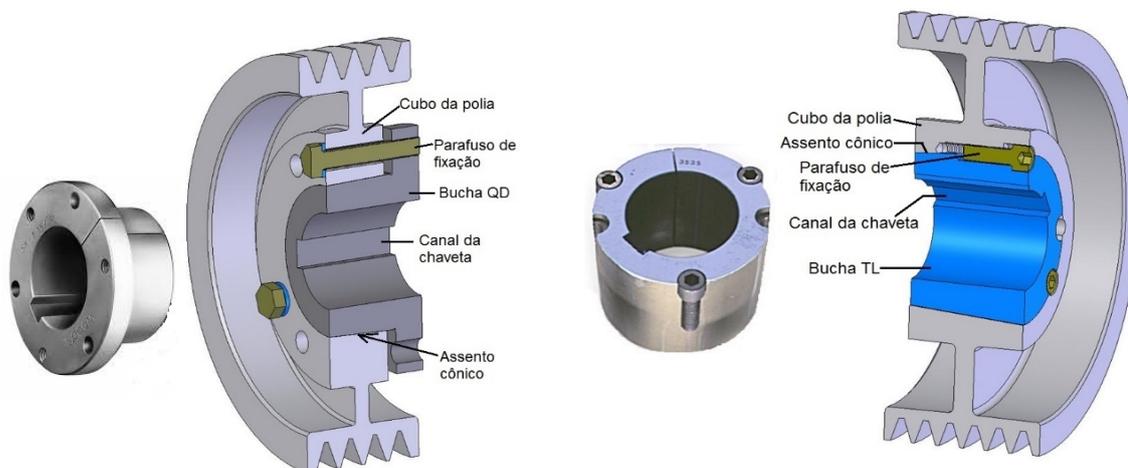


Fonte: Própria

- **Buchas cônicas:** elemento de fixação cubo-eixo que fixam por pressão o cubo de um componente ao eixo. Isto acontece devido ao efeito cunha entre o assento cônico da bucha e o do cubo do componente. O movimento axial relativo entre a bucha e o cubo gerado pelo aperto dos parafusos de fixação resulta em uma pressão radial sobre o cubo pelo assento cônico da bucha, e sobre o eixo pelo diâmetro interno da bucha. Este princípio é o mesmo para as buchas QD segundo a norma (MPTA-B6i: 2004) e TL (MPTA-B9i: 2013). Quando o torque da aplicação é menor que um valor determinado para cada tamanho de bucha, estas dispensam o uso de chaveta para restringir o movimento de giro relativo

ente cubo e eixo. A Figura 4-9 mostra uma bucha QD e uma TL com suas montagens em uma polia.

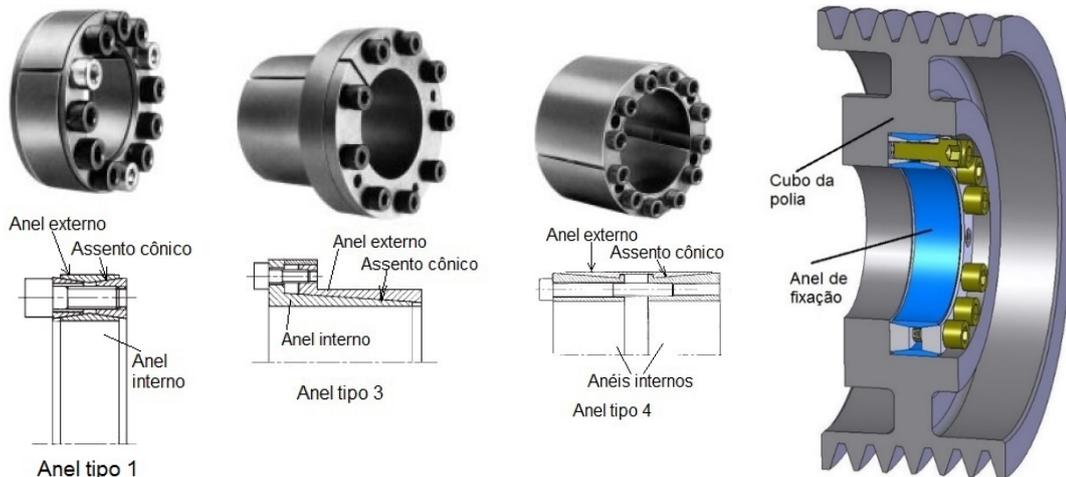
Figura 4-9: Bucha QD e TL com suas montagens em uma polia



Fonte: Própria.

- Anéis de Fixação:** elemento de fixação cubo-eixo que fixam apenas por pressão o cubo de um componente ao eixo. Isto acontece devido ao efeito cunha entre os anéis que possuem um assento cônico. O movimento axial relativo entre os anéis gerado pelo aperto dos parafusos de fixação faz com que haja uma expansão na direção radial, gerando pressão radial sobre o cubo pelo anel externo e sobre o eixo pelo anel interno. Esta pressão fixa os componentes. Neste trabalho, estão sendo considerados apenas três tipos de anéis, porém existem outros tipos com diferentes formas construtivas, mas com o mesmo princípio de funcionamento. A Figura 4-10 mostra os anéis de fixação do tipo 1, 3, 4 e um exemplo de montagem de um anel em uma polia.

Figura 4-10: Anéis de fixação tipo 1, 3 e 4, e exemplo de montagem de um anel em uma polia

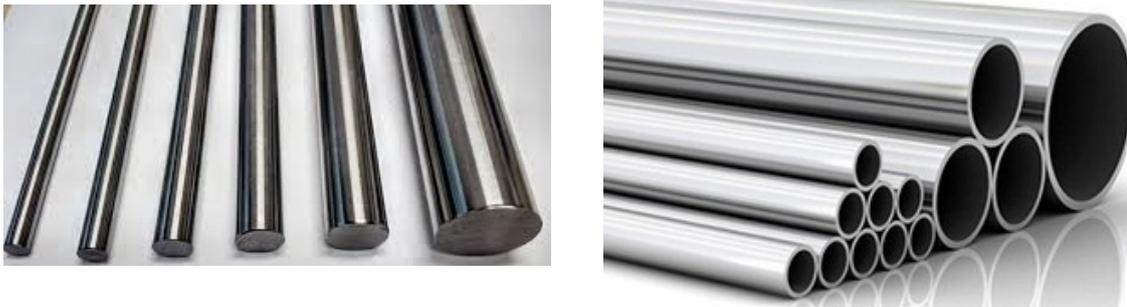


Fonte: Própria

Eixos:

- **Maciços:** elemento rotativo, geralmente de seção transversal circular, utilizado para transmitir potência (SHIGLEY *et al* 2008).
- **Tubulares:** de forma análoga aos maciços, porém, como são ocos, possuem menor peso e, conseqüentemente, menor inércia. A Figura 4-11 mostra os eixos maciços e tubulares.

Figura 4-11: Eixos maciços e tubulares



Fonte: Própria

4.3.2.2 Definição dos tipos de componentes usados em cada classe

Este conhecimento tem a finalidade de auxiliar o usuário no conhecimento específico da aplicação dos componentes.

Mancalização:

- **Mancal de rolamento:** rolamento rígido de esferas, conjunto mancal rolamento rígido de esferas Y com Bucha H, rolamento de esferas contato angular, rolamento de esferas contato angular combinado, rolamento autocompensador de esferas, rolamento autocompensador de esferas com bucha H, rolamento autocompensador de esferas com bucha AH, conjunto mancal com rolamento autocompensador de esferas e bucha H, rolamento de rolo cilíndrico, rolamento de rolo cônico, rolamento de rolo cônico combinado, rolamento autocompensador de rolos, rolamento autocompensador de rolos com bucha H, rolamento autocompensador de rolos com bucha AH, conjunto mancal com rolamento autocompensador de rolos e bucha H, rolamento axial de esferas, rolamento axial de esferas de dupla carreira, buchas radiais, buchas axial, buchas radial e axial.
- **Mancal de deslizamento:** buchas auto lubrificantes.

Transmissão de potência:

- **Correntes de transmissão de potência;**
- **Correias:** clássicas em V nos perfis Z, A, B, C e D; estreitas em V nos perfis 3V, 5V e 8V e micro V;
- **Correias sincronizadas:** de PU (poliuretano com elemento de tração em aramida ou fibra de carbono) e NE (neoprene com elemento de tração em fibra de vidro);
- **Engrenagens:** helicoidais, de dente reto e coroa e sem fim.

Fixação cubo-eixo:

- **Chavetas:** retangulares e quadradas;
- **Buchas:** QD (Quick Detach) e TL (Taper Lock);
- **Anéis de fixação:** tipos 1, 3 e 4.

Eixos:

- **Maciços:** laminada, trefilada e retificada.
- **Tubos:** tubo mecânico e trefilado.

4.3.2.3 Descrever as funções de aplicação das classes de componentes

São apresentadas no ANEXO D: FUNÇÕES DE APLICAÇÃO DE CADA TIPO DE COMPONENTE.

4.3.2.4 Descrever as funções de aplicação de cada tipo de componente

São apresentadas diretamente nas tabelas do ANEXO D: FUNÇÕES DE APLICAÇÃO DE CADA TIPO DE COMPONENTE.

4.3.2.5 Descrever os atributos de cada tipo de componente

Rolamentos e buchas:

Rolamentos rígido de esferas, de esferas contato angular, de esferas contato angular combinado, autocompensador de esferas, axial de esferas, axial de esferas de dupla carreira:

- Forma geral: cilíndrico com furo que pode ser paralelo ou cônico, nos axiais somente paralelo.
- Subpartes: anel interno, elementos rolantes esféricos, gaiola de contenção dos elementos rolantes, anel externo e vedadores quando for o caso.
- Norma: ISO 3290-1:2014 para rolamento de esferas.
- Norma: ISO 12044:2014 para rolamento de esferas de contato angular.
- Normas: ISO 14201:1998, 14216:1998, 14217:1998, 14218:1998, 14219:1998, 14220:1998, 14221:1998 para rolamentos autocompensador de esferas.
- Normas: ISO 5753-2:2010, 16281:2008, para rolamentos axiais de esferas.

Mancal rolamento rígido de esferas Y com Bucha H, mancal com rolamento autocompensador de esferas e bucha H:

- Forma geral: depende do tipo de mancal que pode ser de apoio, flange, tensor, cartucho ou chapa; e cada um destes tipos possui variações em sua forma externa em função do tipo, da posição de montagem e fixação, com furo interno paralelo para o eixo.

- Subpartes: bucha cônica H, porca KM, arruela de trava, anel interno, elementos rolantes esféricos, gaiola de contenção dos elementos rolantes, anel externo, vedadores e carcaça do mancal.
- Norma: ISO 2982-1:2013, DIN 5415:2009 para buchas cônicas.
- Norma: ISO 3228:2013 para mancais de rolamentos, fundido e prensado.
- Norma: DIN 5406:1993 para arruela de trava.
- Norma: ISO 2982-2:2013 para porca KM.

Rolamento de rolo cônico, e de rolo cônico combinado:

- Forma geral: cilíndrico com furo paralelo.
- Subpartes: anel interno, elementos rolantes na forma de rolos cônicos, gaiola de contenção dos elementos rolantes e anel externo.
- Normas: ISO 355:2007, 10317:2008, 1002:1983, 5753-1:2009 para rolamento de rolo cônico.

Rolamento autocompensador de rolos com bucha H, autocompensador de rolos com bucha AH:

- Forma geral: cilíndrico com furo paralelo.
- Subpartes: bucha cônica H ou AH, porca KM, arruela de trava, anel interno, elementos rolantes cilíndricos abaulados, gaiola de contenção dos elementos rolantes, anel externo.
- Norma: ISO 15242-3:2006, 14190:1998 a 14197:1998 para rolamento autocompensador de rolos.

Mancal com rolamento autocompensador de rolos e bucha H:

- Forma geral: depende do tipo de mancal que pode ser de apoio ou flange, e cada um destes tipos possui variações em sua forma externa em função do tipo, da posição de montagem e fixação, com furo interno paralelo para o eixo.
- Subpartes: bucha cônica H, porca KM, arruela de trava, anel interno, elementos rolantes esféricos, gaiola de contenção dos elementos rolantes, anel externo, anéis espaçadores, vedadores e carcaça do mancal.

Rolamento autocompensador de esferas com bucha AH:

- Forma geral: cilíndrico com furo paralelo.
- Subpartes: bucha cônica AH, porca KM, arruela de trava, anel interno, elementos rolantes esféricos, gaiola de contenção dos elementos rolantes, anel externo.

Rolamento de rolo cilíndrico:

- Forma geral: cilíndrico com furo paralelo.
- Subpartes: anel interno, elementos rolantes cilíndricos, gaiola de contenção dos elementos rolantes e anel externo.
- Normas: ISO 12043:2007, 246:2007, 1002:1983, 5753-1:2009 para rolamentos de rolos cilíndricos.

Rolamento autocompensador de rolos:

- Forma geral: cilíndrico com furo paralelo ou cônico.
- Subpartes: anel interno, elementos rolantes cilíndricos abaulados, gaiola de contenção dos elementos rolantes, anel externo e vedadores quando for o caso.

Buchas radiais, buchas axiais, buchas radiais e axiais:

- Forma geral: cilíndrico com furo paralelo, podendo ser flangeada.
- Subpartes: sem.
- Normas: ISO 2795:2014 para buchas sinterizadas.
- Normas: ISO 6691:2000 para buchas feitas de termoplásticos.
- Normas: ISO 19259:2015 para buchas com lubrificantes sólidos.

Materiais dos rolamentos: os anéis internos e externos podem ser feitos em aço cromo níquel, cromo manganês, inox AISI 440C. Os elementos rolantes com os mesmos materiais dos anéis além de vidro, cerâmica e polímeros. As gaiolas podem ser feitas de poliamida, latão chapas de aço AISI 1020 ou 304. Os vedadores podem ser feitos de chapas de aço, borracha nitrílica, sintética e feltro. Os materiais das carcaças dos mancais em ferro fundido cinzento ou nodular. As buchas e porcas são fabricadas em aço 1020, 1045 ou ferro fundido nodular. As arruelas de trava são fabricadas em aço 1020. As buchas podem ser feitas de ligas de bronze fundidas ou sinterizadas, termoplásticos, ou chapas de aço com deposição de bronze e teflon.

Processo de fabricação dos rolamentos: os anéis internos e externos são feitos por forjamento, torneamento, retificação e tratamento térmico de tempera. As esferas e rolos são processados por meio de corte de uma barra de aço, forjamento, desbaste, polimento e tempera. As gaiolas de chapa são estampadas, prensadas, e rebitadas, e tratadas termicamente, as de plástico injetadas e rebarbadas e as de latão forjadas e usinadas. Os vedadores de chapa são estampados, e os de borracha são vulcanizados. As carcaças são fundidas e usinadas. As buchas de ferro fundido são fundidas e usinadas, as de aço corte de tubo e usinagem. As porcas KM podem ser fundidas ou forjadas e usinadas. As arruelas de trava são estampadas. As buchas podem ser fundidas, forjadas, estampadas, injetadas e sinterizadas.

Transmissão por correntes:

- Forma geral: elemento flexível na forma de elos, engrenagens na de cilindros com denteado na periferia.
- Subpartes: placa interna e externa, bucha rolos e pinos na corrente, engrenagens.
- Normas: ISO 1275:2006, 606:2015, 15654:2015, 1977:2006, para correntes, ISO 1977:2006 e ISO 13203:2005 engrenagens e acessórios.
- Materiais: aço carbono, inox, polímeros.
- Processo de fabricação: Os elos de uma corrente são estampados tratados termicamente por tempera, polidos, e em certos casos sofrem um tratamento superficial de proteção a corrosão, os de polímeros são injetados. As buchas e rolos são feitos por meio de processo de corte de tubos e o pino corte de barra de aço. As engrenagens são fundidas e usinadas, chapas cortas, quando feitas de polímeros são injetadas.

Transmissão por correias em V:

- Forma geral: elemento flexível com seção longitudinal na forma de um tronco piramidal similar a um V.
- Subpartes: correia e polias.
- Normas: NBR 15070:2013 Correias hexagonais, NBR 15003:2012 Correias em V para serviços leves, NBR 15002:2012 Correias em V estreitas, NBR 15356:2016 Correias Variadoras de Velocidade, NBR 15406:2016 Correias V

para máquinas agrícolas, ISO 4183:1995 canais para polias clássicas e estreitas.

- Materiais: elementos de tração em fibra de vidro ou aramida, corpo em borracha, as polias são feitas em alumínio, ferro fundido cinzento e nodular, aço, chapas de aço e polímeros termoplásticos.
- Processo de fabricação: para correias vulcanização, para polias fundição, coquilhamento, injeção, usinagem balanceamento tratamento superficial.

Transmissão por correias micro V:

- Forma geral: elemento flexível com seção longitudinal na forma de vários V's unidos em sua parte superior pelo corpo da correia.
- Subpartes: correia e polias.
- Normas: NBR 15177:2013 para correias micro V, ISO 9982:1998 polias para correias micro V.
- Materiais: elementos de tração em fibra de vidro ou aramida, corpo em borracha, as polias são feitas em alumínio, ferro fundido cinzento e nodular, aço, e polímeros termoplásticos.
- Processo de fabricação: para correias vulcanização, para polias fundição, coquilhamento, injeção, usinagem balanceamento e tratamento superficial.

Transmissão por correias sincronizadas:

- Forma geral: elemento flexível com seção transversal na forma de um denteado que pode ser de perfil trapezoidal, redondo ou parabólico.
- Subpartes: correia e polias.
- Normas: ISO 5288:2001, ISO 5288:2001, ISO 5295:1987, ISO 13050:2014 para correias sincronizadas, e ISO 5294:2012 para as polias.
- Materiais: correia em PU (poliuretano com elemento de tração em aramida, fibra de carbono ou aço) e correia em NE (neoprene com elemento de tração em fibra de vidro), as polias são feitas em alumínio, ferro fundido cinzento e nodular, aço e polímeros termoplásticos.
- Processo de fabricação: para correias vulcanização, para polias fundição, coquilhamento, injeção, usinagem balanceamento e tratamento superficial.

Transmissão por engrenagens helicoidais, de dente reto e coroa e sem fim:

- Forma geral: elemento cilíndrico rígido apresentando um denteado no diâmetro externo visto na seção transversal, sem fim com forma cilíndrica e uma ronca helicoidal.
- Subpartes: não.
- Normas: AGMA 915-1-A02, ANSI/AGMA 1003-H07, DIN 780-1:1977, DIN 862:2015, DIN 867:1986, DIN 868:1976, ISO 6336-6:2006, AGMA ISO 14179-1.
- Materiais: aços, ferro fundido cinzento e nodular, bronze, alumínio, e polímeros termoplásticos.
- Processo de fabricação: fundição, forjamento, injeção, usinagem, retificação, balanceamento e tratamento superficial.

Fixação cubo-eixo chavetas:

- Forma geral: barra retangular, barra quadrada.
- Subpartes: não.
- Normas: DIN 6885:1968, ANSI B17.1-1967 - R1998
- Materiais: aço.
- Processo de fabricação: laminação, trefilação, usinagem e tratamento superficial.

Fixação cubo-eixo, buchas QD (Quick Detach) e TL (Taper Lock).

- Forma geral: bucha QD e TL forma cilíndrica com diâmetro externo cônico e furo paralelo com rasgo de chaveta, a bucha QD apresenta flange
- Subpartes: corpo e parafusos de fixação, na QD é incluído arruelas de pressão.
- Normas: buchas QD MPTA-B6i-2004, bucha TL MPTA-B9i-2013
- Materiais: aços, ferro fundido cinzento e nodular.
- Processo de fabricação: fundição, sinterização, usinagem e tratamento superficial.

Fixação cubo-eixo, anéis de fixação.

- Forma geral: cilíndrica com furo paralelo.

- Subpartes: anéis internos, externos, de fixação e parafusos de fixação.
- Materiais: aços.
- Processo de fabricação: fundição, sinterização, usinagem e tratamento superficial.

Eixos maciços.

- Forma geral: cilíndrica
- Subpartes: sem,
- Normas: NBR 11294:1990 Barras aço ao carbono e ligado, NBR 8647:1988 Barras de aço de qualidade especial, com acabamento de superfície
- Materiais: ligas metálicas como aços e alumínio, polímeros.
- Processo de fabricação: fundição contínua, laminação, trefilação, usinagem e tratamento superficial.

Eixos tubulares.

- Forma geral: cilíndrica com furo central.
- Subpartes: sem,
- Normas: DIN 2393:1981 Tubo trefilado de precisão, NBR 8261:2010 Tubos para fins estruturais, NBR 6591:2008 Tubos soldados para fins industriais.
- Materiais: ligas metálicas como aços e alumínio, polímeros.
- Processo de fabricação: fundição contínua, laminação, trefilação, usinagem e tratamento superficial.

4.3.2.6 Informações logísticas e de custos

Estas informações estão concentradas nas descrições das funções de aplicação específicas de cada tipo de componente e nas matrizes de decisão.

4.3.2.7 Dimensionamento de componentes e interfaces

Neste trabalho, serão apenas desenvolvidos a formulação matemática para o dimensionamento dos componentes do grupo funcional fixação cubo-eixo, bem como o dimensionamento das interfaces das peças onde irão se conectar. Estes algoritmos são baseados na literatura técnica, catálogos técnicos e normas, e são apresentados

no ANEXO E: FORMUÁRIO DE CÁLCULO DO GRUPO FIXAÇÃO CUBO-EIXO E SUAS INTERFACES..

4.3.3 Montagem das matrizes de decisão

A partir das matrizes de decisão, serão geradas as perguntas dos requisitos de aplicação que o SE fará ao usuário. Além disto, seus índices de desempenho serão inseridos no banco de dados do SE para que a ferramenta multicritério possa fazer o ranqueamento.

4.3.3.1 Definir os requisitos de seleção na forma de uma pergunta

Esta tarefa será feita diretamente nas matrizes de decisão que estão no ANEXO F: MATRIZES DE DECISÃO.

4.3.3.2 Se necessário definir uma métrica para um determinado requisito de seleção

Esta tarefa será feita diretamente nas matrizes de decisão que estão no ANEXO F: MATRIZES DE DECISÃO.

4.3.3.3 Definir o índice de exclusão e a classe de componente que é a referência em atendimento de um determinado requisito de aplicação

Como pode ser observado no ANEXO F: MATRIZES DE DECISÃO, algumas perguntas não têm índice de desempenho, pois são valores numéricos com uma unidade específica que o usuário deverá preencher quando usa o SE. Estes valores são usados pelo SE para dimensionar o componente e suas interfaces. As perguntas que possuem índice de desempenho deverão ser respondidas com valores de 0 a 10, sendo que 0 representa um requisito não necessário, 1 representa um requisito pouco importante e 10 representa um requisito de grande importância. Estes valores são usados pelo SE para que o método multicritério possa fazer o ranqueamento das alternativas.

As células da matriz de decisão (Tabela F.1) com valores em verde indicam os componentes que são referência em um determinado requisito de aplicação. As

marcadas em amarelo indicam um requisito cujo componente é incapaz de atender. As células em branco indicam que o componente pode, em maior ou menor grau, atender ao requisito de aplicação.

Nas matrizes de decisão do ANEXO F: MATRIZES DE DECISÃO, as perguntas que não possuem índice de desempenho são os valores que o usuário irá preencher quando estiver usando o SE, para que o mesmo possa fazer a seleção e o dimensionamento das alternativas possíveis. Estes valores também são usados para o dimensionamento das interfaces como, por exemplo, o diâmetro mínimo de um cubo para acomodar um anel de fixação.

Para os componentes pertencentes aos grupos funcionais de mancalização, transmissão e eixos, o processo de seleção é feito apenas com os requisitos de aplicação, não envolvendo dimensionamento destes componentes e suas interfaces.

Na matriz de decisão de transmissões, no ANEXO F: MATRIZES DE DECISÃO, as duas primeiras perguntas se referem a potência e rotação, usadas para auxiliar na seleção por dois critérios. O primeiro é a faixa de velocidade e potência de aplicação. O segundo critério é através da potência por rotação (CV/rpm). Estes critérios são usados para definir qual perfil de correia ou passo de corrente é mais adequado a uma dada rotação e potência de uma aplicação. Estes dois critérios são usados apenas para correias e correntes cujos gráficos de potência por velocidade são mostrados no ANEXO F: MATRIZES DE DECISÃO, sendo inseridas na forma de um banco de dados no SE. As engrenagens não entram neste processo pois podem ser dimensionadas para todas as faixas de velocidade e potência em que atuam as correias e correntes.

4.3.3.4 Cálculo do índice de desempenho relativo

Nesta aplicação, como os componentes de referência tem um índice de desempenho igual a 10, o índice de desempenho relativo não se altera. Isso não aconteceria se o componente de referência tivesse um índice de desempenho diferente de 10.

4.3.4 Construir o conhecimento das interfaces dos componentes

Este conhecimento será construído a partir da modelagem computacional das interfaces dos componentes e da descrição dos requisitos dessas interfaces. Isso será utilizado na próxima etapa, para a descrever os requisitos que a interface de um componente gera em outro.

4.3.4.1 Modelar os componentes e identificar as superfícies que são interfaces

Esta tarefa é feita de forma simultânea ao processo de descrição dos tipos e requisitos de cada interface.

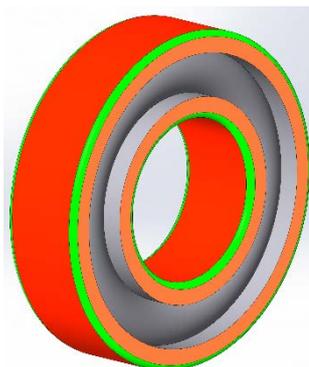
4.3.4.2 Descrever os tipos e os requisitos de cada interface

Grupo funcional mancalização:

As tarefas 5.3.4.1 e 5.3.4.2 serão feitas simultaneamente. A Figura 4-12 mostra as principais interfaces dos rolamentos rígidos de esfera, auto compensador de esfera e auto compensador de rolos e de rolos. No diâmetro interno, a superfície em vermelho exige tolerâncias no eixo que podem ir de um ajuste g6 para lado livre no eixo até n6 para rolamentos de esferas, e s6 para grandes rolamentos de rolo com ajuste fixo. No anel externo, a tolerância no cubo pode ir de F7 para lado livre no cubo até P6. A rugosidade para o eixo varia de 0,8 a 1,6Ra e, para os alojamentos 1,6 a 3,2Ra. As tolerâncias de forma não serão abordadas. As laterais dos anéis interno e externo, mostradas na cor laranja, são utilizadas para fixação axial e possuem tolerância, que depende do arranjo dos rolamentos, e rugosidade de 6,3 a 3,2Ra, dependendo da aplicação.

Os raios de concordância, na cor verde, dependem do tamanho do rolamento e devem ser usados tanto no eixo como no cubo para atenuar a concentração de tensão, por exemplo, entre a transição do eixo para o assento de rolamento. As superfícies na cor cinza não são interfaces com outros componentes.

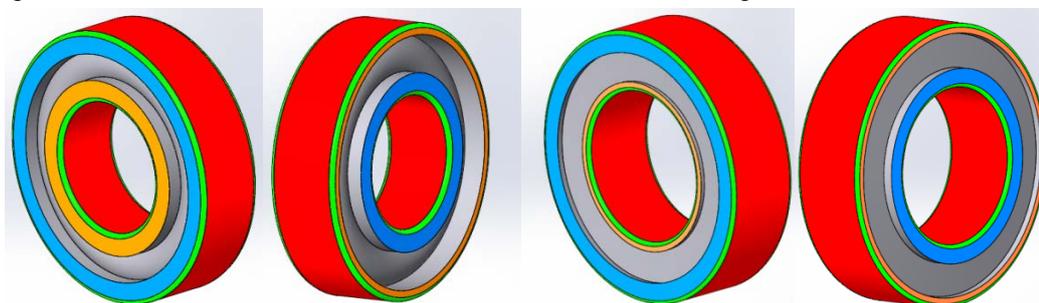
Figura 4-12: Interfaces dos rolamentos rígido de esfera, auto compensador de esfera, compensador de rolos e de rolos



Fonte: Própria

A Figura 4-13 mostra as principais interfaces dos rolamentos de esfera de contato angular e de rolos cônicos. São similares ao caso anterior, porém possuem uma particularidade: são as duas superfícies em azul que tem a função de transferir as forças axiais, estando sempre em lados opostos em relação aos anéis interno e externo, e são imprescindíveis nestes tipos de rolamentos. As superfícies em laranja nem sempre são usadas, e quando são é apenas para fixar os anéis do rolamento.

Figura 4-13: Interfaces dos rolamentos de esfera de contato angular e de rolos cônicos



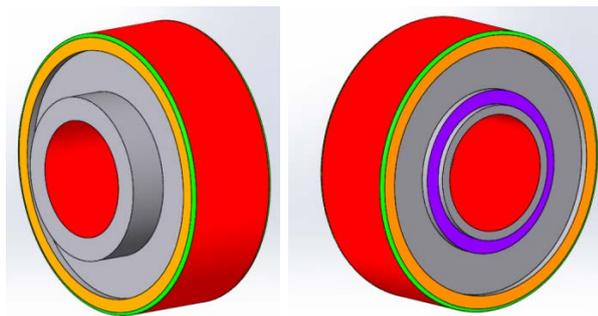
Rolamento de esfera de contato angular

Rolamento de rolos cônicos

Fonte: Própria

A Figura 4-14 mostra as interfaces dos rolamentos autocompensador de esferas e autocompensador de rolos com bucha H. A particularidade destes rolamentos com bucha é que no anel interno não há interface para fixação axial. Eventualmente, na superfície roxa, é possível usar um anel para a desmontagem do rolamento da bucha. Nestes rolamentos, a superfície em vermelho que é o assento no eixo e, como usa uma bucha cônica, uma tolerância h9 é suficiente.

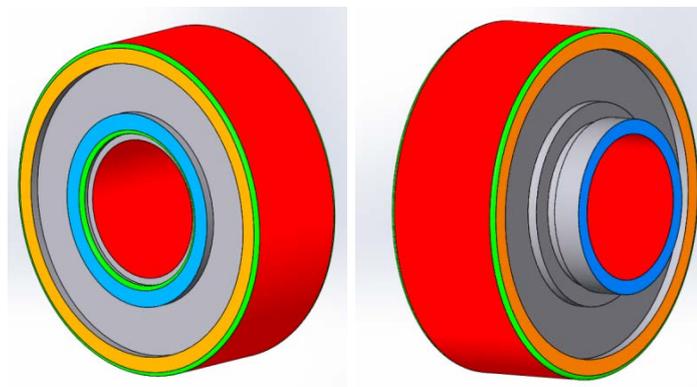
Figura 4-14: Interfaces dos rolamentos autocompensador de esferas e autocompensador de rolos com bucha H



Fonte: Própria

A Figura 4-15 mostra as interfaces dos rolamentos autocompensador de esferas e autocompensador de rolos montados com bucha AH. A particularidade destes rolamentos com bucha AH é que, no anel interno do rolamento (imagem esquerda, superfície azul, e na imagem direita, superfície azul), as buchas são imprescindíveis e servem para fixar axialmente e ajustar a folga do rolamento. O requisito destas superfícies é uma rugosidade de 3,2Ra. Nestes rolamentos, a superfície em vermelho que é o assento no eixo e, como usa uma bucha cônica, uma tolerância h9 é suficiente.

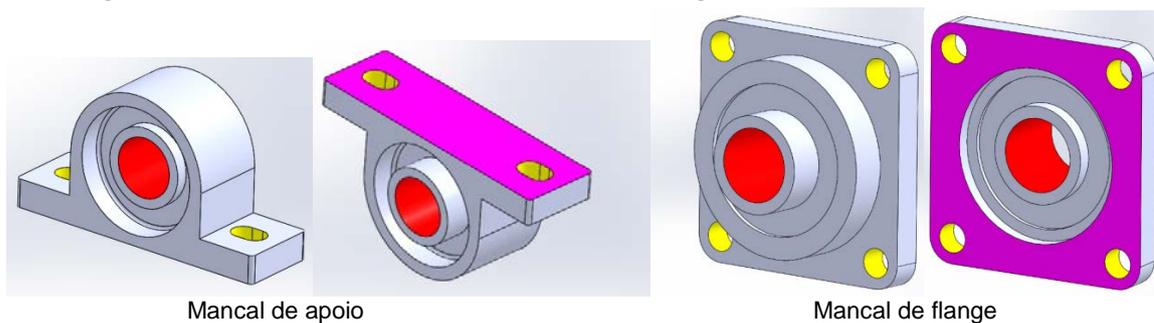
Figura 4-15: Interfaces dos rolamentos autocompensador de esferas e autocompensador de rolos com bucha AH



Fonte: Própria

A Figura 4-16 mostra as interfaces de dois tipos de mancal de rolamento rígido de esferas Y e com Bucha H, os de apoio e flange. Nestes mancais de rolamentos a superfície em vermelho é o assento no eixo e, como usa uma bucha cônica, uma tolerância h9 e rugosidade 3,2Ra são suficientes. A superfície em rosa é usada para apoio e deve ter rugosidade melhor ou igual a 12,5Ra, além de uma planicidade medida diagonalmente de acordo com o grau de tolerância IT7. A superfícies em amarelo representam furos (passantes ou roscados) para os parafusos de fixação.

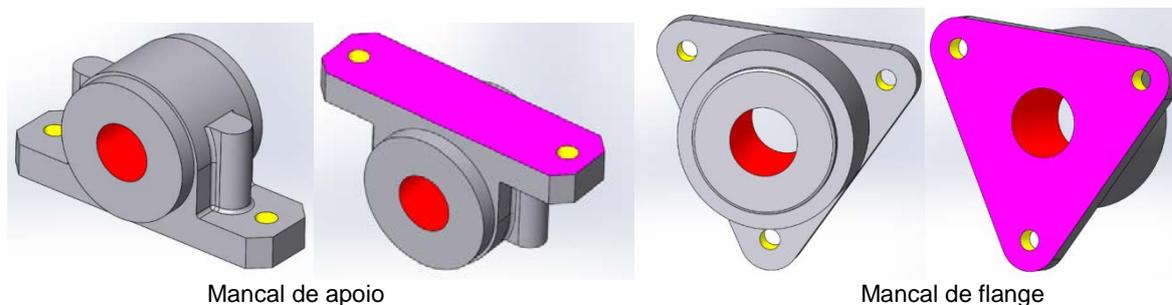
Figura 4-16: Interfaces dos mancais de rolamento rígido de esferas Y e com Bucha H



Fonte: Própria.

A Figura 4-17 mostra as interfaces de dois tipos de mancal, com rolamento autocompensador de esferas e autocompensador de rolos, ambos sobre bucha H e nas configurações de mancal de apoio e de flange. Nestes mancais de rolamentos, a superfície em vermelho do assento no eixo usa uma bucha cônica. Assim, uma tolerância $h9$ e rugosidade $3,2Ra$ é suficiente. Dependendo do tipo de vedador usado, a rugosidade exigida do eixo pode ser de $1,6Ra$. A superfície em rosa é usada para apoio e deve ter rugosidade melhor ou igual a $12,5Ra$, além de uma planicidade medida diagonalmente de acordo com o grau de tolerância $IT7$. As superfícies em amarelo representam furos (passantes ou roscados) para os parafusos de fixação.

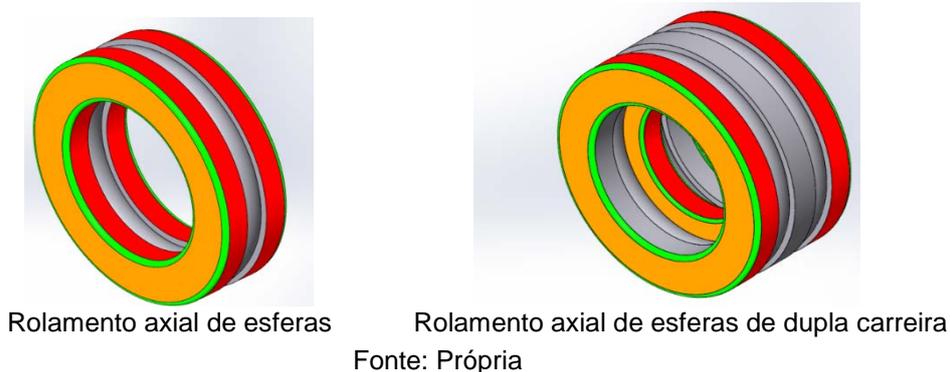
Figura 4-17: Interfaces dos mancais de rolamentos autocompensador de esferas e autocompensador de rolos com bucha H



Fonte: Própria

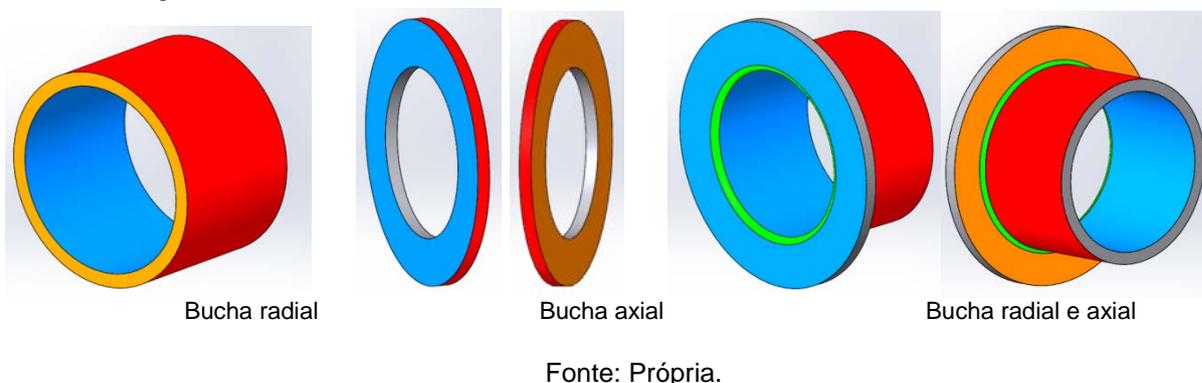
A Figura 4-18 mostra as interfaces do rolamento axial de esferas, na esquerda, e do rolamento axial de esferas de dupla carreira, na direita. No rolamento axial, a superfície em vermelho do assento no eixo pode usar uma tolerância $j6$, enquanto que o de dupla carreira pode usar uma tolerância $k6$. Na superfície em vermelho do assento no alojamento pode usar uma tolerância que pode variar de $E8$ a $H6$. A rugosidade dos assentos axiais e radiais são de $3,2Ra$.

Figura 4-18: Interfaces do rolamento axial de esferas e do rolamento axial de esferas de dupla carreira



A Figura 4-19 mostra as interfaces das buchas radiais, buchas axiais e buchas radial e axial. Nas buchas, as superfícies em azul são críticas, pois estão em contato com a parte girante e exigem uma rugosidade de 2 a 3 Rz, já que valores maiores que 4,5 Rz diminuem a vida útil das buchas em 50%. A tolerância para os eixos menores que 80mm é f7 e, para os maiores, h8. As superfícies em vermelho, que são para o alojamento, devem ter tolerância H7 e rugosidade até 6,3Ra. As superfícies em laranja, que são faces de encosto das buchas, não necessitam de tolerância e podem ter rugosidade entre 6,3 e 12,5Ra.

Figura 4-19: Interfaces das buchas radiais, buchas axiais e buchas radial e axial

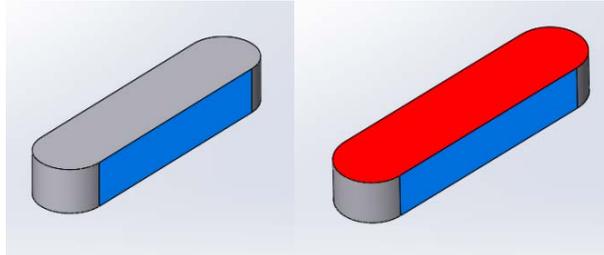


Grupo funcional fixação cubo-eixo:

A Figura 4-20 mostra as interfaces de uma chaveta vista de cima (imagem da esquerda) e de baixo (imagem da direita), com a interface que toca no fundo do canal do eixo. A tolerância na profundidade do canal varia de +0,1 a + 0,3mm apenas no cubo. A rugosidade no fundo do canal do eixo e do cubo deverá ser 12,5Ra ou melhor. As superfícies laterais da chaveta, na cor azul, que se interfaceiam com o cubo, tem tolerância que varia de JS9 a P9, e n9 a p9 no eixo, e em ambas uma rugosidade de

3,2Ra. Para o uso da chaveta, é necessária uma usinagem radial no cubo com a tolerância normalmente sendo H7 e no eixo variando de j6 a s6, e com rugosidade de 3,2Ra em ambas. A chaveta apresenta uma particularidade, pois a usinagem radial no cubo e no eixo não tem interface com nenhuma superfície da chaveta, porém é necessária para o uso deste componente.

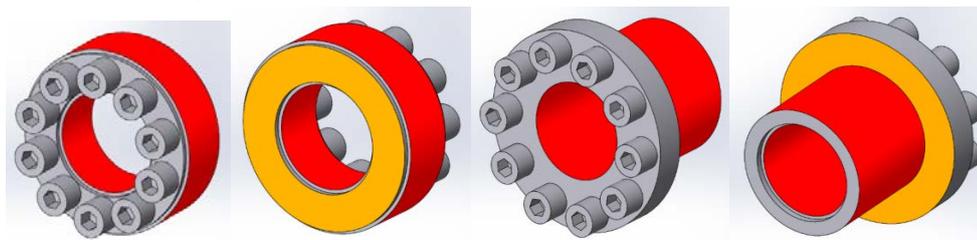
Figura 4-21: Interfaces de uma chaveta



Fonte: Própria

A Figura 4-22 mostra as interfaces dos anéis tipos 1, 3 e 4. A diferença para os anéis 1 e 4 é apenas sua largura, as interfaces são as mesmas. Na superfície interna, em vermelho, o requisito de tolerância para o eixo varia de h11 a k11. No diâmetro externo do anel, a tolerância para o cubo varia de N11 a H11. A rugosidade do eixo e do alojamento do cubo é de no máximo 3,2Ra. As superfícies em laranja são de encosto do anel e não necessitam de tolerância e nem de rugosidade controlada.

Figura 4-22: Interfaces os anéis de fixação tipo 1, 3 e 4



Anéis tipo 1 e 4

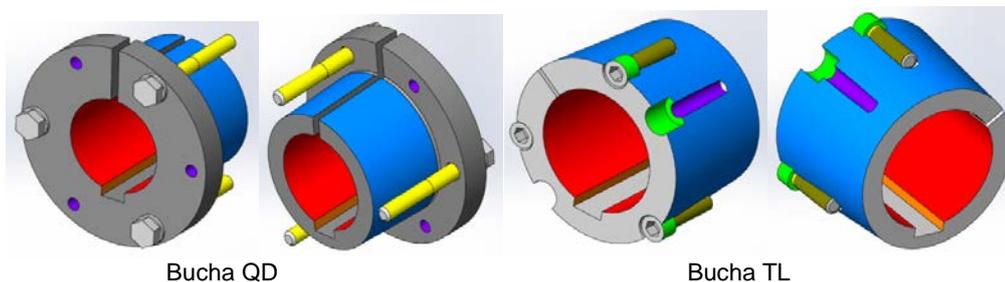
Anel tipo 3

Fonte: Própria

A Figura 4-23 mostra as interfaces da bucha QD, à esquerda, e da TL, à direita. Na superfície interna, em vermelho, a tolerância para o eixo é h9 com rugosidade máxima de 6,3Ra. A superfície em azul, para o furo no cubo, deverá ter tolerância H9 e rugosidade de 3,2Ra, apresentando uma conicidade de $1,47^{\circ} \pm 2'$ na bucha QD e $4^{\circ} \pm 2'$ na bucha TL. A superfície em laranja, do canal de chaveta, tem tolerância de JS9 a P9 no cubo e n9 a p9 no eixo, e rugosidade de 3,2Ra ou melhor. A tolerância da profundidade do canal no eixo e no cubo variam de +0,1 a + 0,3mm, dependendo

do tamanho da chaveta, e rugosidade de 12,5Ra ou melhor. As superfícies em amarelo exigem de 2 a 5 furos com rosca UNC para fixação reversa da bucha QD e as superfícies em roxo exigem de 2 a 5 furos passantes para sua fixação normal. Nas buchas TL, as superfícies em amarelo exigem de 2 a 5 furos de fixação com rosca UNC no cubo, dependendo do tamanho da bucha. As superfícies roxas exigem de 1 a 3 furos sem rosca, para sua extração, dependendo do tamanho da bucha. Nas buchas TL, a partir do tamanho 3535, há um rebaixo no furo de fixação para a cabeça do parafuso.

Figura 4-23: Interfaces das buchas QD e TL

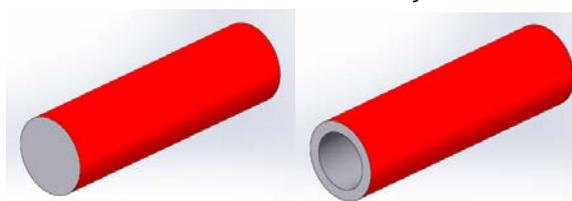


Fonte: Própria

Grupo funcional eixos:

A Figura 4-24 mostra a interface de um eixo maciço e um tubular. No tubular, apenas será considerado o diâmetro externo. Para os diferentes tipos de eixos, serão mostrados os requisitos que as interfaces que irão se conectar a estes eixos deverão atender.

Figura 4-24: Interface de um eixo maciço e um tubular



Fonte: Própria

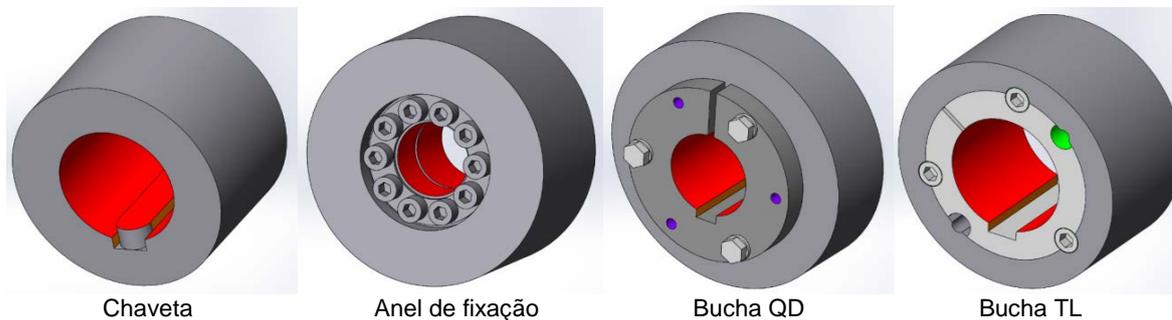
- **Barra redonda maciça retificada:** com tolerâncias de h7 a h11 e rugosidade de 0,4Ra.
- **Barra redonda maciça trefilada:** com tolerâncias de h9 a h11 e rugosidade de 0,4Ra.

- **Barra redonda maciça laminada:** como precisa ser obrigatoriamente usinada, estará apta a se acoplar diretamente na interface de qualquer componente considerado neste SE.
- **Tubo mecânico:** como precisa ser obrigatoriamente usinado, estará apto a se acoplar a interface de qualquer componente considerado neste SE.
- **Tubo trefilado:** como precisa ser obrigatoriamente usinado, estará apto a se acoplar a interface de qualquer componente considerado neste SE.

Grupo funcional transmissões:

A Figura 4-25 mostra as interfaces dos grupos de transmissão. Neste grupo, as correias e correntes tem conexão com as polias e engrenagens. Porém, estas interfaces não mudam e são padronizadas, elas não se relacionam com nenhum outro componente e, portanto, não são consideradas nos projetos. Entretanto, toda a engrenagem e polia tem um cubo, que é a interface com a qual se acopla aos eixos, e estes cubos são preparados para os elementos de fixação cubo-eixo. Assim, quando se compra componentes de transmissão que são padronizados, o projetista irá definir com que meio de fixação cubo-eixo será fornecido. Desta forma, os componentes de transmissão possuem as mesmas interfaces para os eixos que os componentes do grupo de fixação cubo-eixo. Por exemplo, uma transmissão por correia em V pode ser fornecida com suas polias e seus cubos preparados para chavetas, anéis de fixação ou buchas. O mesmo ocorre com correntes, correias sincronizadas entre outros.

Figura 4-25: Interfaces dos componentes de transmissão



Fonte: Própria

4.3.5 Construir o conhecimento de compatibilidade entre interfaces dos grupos de componentes

Este conhecimento, que é inserido nas matrizes de dependência para descrever os requisitos que a interface de um componente gera em outro, servirá para a construção das regras de compatibilidade do SE, para que possa usá-las no processo de seleção.

4.3.5.1 Definir dois grupos funcionais e inseri-los na matriz de dependência, um grupo nas linhas e outro nas colunas

Esta tarefa é feita de forma simultânea ao processo de descrever os requisitos que a interface do grupo da linha requer dos componentes do grupo da coluna e vice-versa.

4.3.5.2 Descrever os requisitos que a interface do grupo da linha requer dos componentes do grupo da coluna e vice-versa

As matrizes de dependência apresentam duas cores, verde e laranja. A verde é usada quando dois componentes têm interfaces totalmente compatíveis entre si e podem ser montados diretamente, sem a necessidade de nenhum processo de fabricação que tornem suas interfaces compatíveis. A cor laranja significa que, entre os componentes, é necessário algum processo de fabricação para tornar suas interfaces compatíveis.

As matrizes também mostram os requisitos das interfaces que os componentes do grupo funcional da linha exigem dos componentes da coluna, e vice-versa. A notação “bucha QD > barra laminada” representa, por exemplo, o requisito que a interface da bucha exige do eixo, para que possam ser acoplados. Quando dois ou mais componentes tiverem os mesmos requisitos em relação a outro, eles adotarão a seguinte notação: “bucha QD e TL > barra laminada”.

Requisitos de interface entre eixo e fixação cubo-eixo:

A Tabela 4-1 mostra a matriz de dependência entre os grupos funcionais de eixos, nas linhas, e fixação cubo-eixo, nas colunas. Esta matriz possui uma particularidade, já que serão mostrados apenas os requisitos das interfaces que os componentes de

fixação cubo-eixo exigem dos eixos. Isto acontece pelo fato de tais componentes serem padronizados e, devido a isso, o SE proposto considera que não sofrerão nenhum processo de fabricação que altere suas interfaces. Ou seja, componentes padronizados são usados na forma em que são fornecidos. Assim, os eixos não irão gerar requisitos de interface nos componentes de fixação cubo-eixo.

Tabela 4-1: Matriz de dependência eixos X fixação cubo-eixo

	Bucha QD	Bucha TL	Anel Fixação	Chaveta
Barra Laminada				
Barra Trefilada				
Barra Retificada				
Tubo Mecânico				
Tubo Trefilado				

Fonte: Própria

- *Bucha QD e TL > Barra laminada*: usinagem radial com tolerância igual ou melhor que h9, e rugosidade máxima de 6,3Ra. Canal de chaveta com tolerância entre n9 e p9 na largura com rugosidade máxima de 3,2Ra e tolerância na profundidade de +0,1 a + 0,3mm dependendo do tamanho da chaveta, com rugosidade de 12,5Ra ou melhor.
- *Bucha QD e TL > Barra trefilada e Barra retificada*: se a barra tiver tolerância h9 ou melhor, não é preciso usinagem radial, a não ser que seja necessário fazer um rebaixo no eixo. Canal de chaveta com tolerância entre n9 e p9 na largura com rugosidade máxima de 3,2Ra e tolerância na profundidade de +0,1 a +0,3mm dependendo do tamanho da chaveta e rugosidade de 12,5Ra ou melhor.
- *Bucha QD e TL > Tubo mecânico e Tubo trefilado*: usinagem radial com tolerância igual ou melhor que h9, e rugosidade máxima de 6,3Ra. Canal de chaveta com tolerância entre n9 e p9 na largura com rugosidade máxima de 3,2Ra, tolerância na profundidade de +0,1 a +0,3mm, dependendo do tamanho da chaveta, e rugosidade de 12,5Ra ou melhor. A espessura do tubo deverá maior ou igual a 1,25 vezes a profundidade do canal da chaveta.
- *Anel de fixação > Barra laminada*: usinagem radial com tolerância igual ou melhor que h9, e rugosidade máxima de 3,2Ra.

- *Anel de fixação > Barra trefilada e Barra retificada*: se a barra tiver tolerância h11 ou melhor e rugosidade 3,2Ra ou melhor, não é preciso usinagem radial, a não ser que seja necessário fazer um rebaixo no eixo.
- *Anel de fixação > Tubo mecânico e Tubo trefilado*: usinagem radial com tolerância igual ou melhor que h9, e rugosidade máxima de 3,2Ra. A parede do tubo deverá ter espessura suficiente para que o tubo possa suportar as pressões radiais do anel dentro do limite elástico.
- *Chaveta > Barra laminada e trefilada*: usinagem radial com tolerância de j6 a s6 e rugosidade de 6,3 a 3,2Ra. Canal de chaveta com tolerância entre n9 e p9 na largura com rugosidade máxima de 3,2Ra e tolerância na profundidade de +0,1 a +0,3mm, dependendo do tamanho da chaveta, e rugosidade de 12,5Ra ou melhor.
- *Chaveta > Barra retificada*: usinagem radial com tolerância de j6 a s6 e rugosidade de 6,3 a 3,2Ra somente se for necessário fazer um rebaixo no eixo. Canal de chaveta com tolerância entre n9 e p9 na largura com rugosidade máxima de 3,2Ra e tolerância na profundidade de +0,1 a +0,3mm, dependendo do tamanho da chaveta, e rugosidade de 12,5Ra ou melhor.
- *Chaveta > Tubo mecânico e Tubo trefilado*: usinagem radial com tolerância de j6 a s6 e rugosidade de 6,3 a 3,2Ra. Canal de chaveta com tolerância entre n9 e p9 na largura com rugosidade máxima de 3,2Ra e tolerância na profundidade de +0,1 a +0,3mm, dependendo do tamanho da chaveta, e rugosidade de 12,5Ra ou melhor.

Requisitos de interface entre eixo e transmissões:

A Tabela 4-2 mostra a matriz de dependência entre os grupos funcionais de eixos, nas colunas, e transmissões, nas linhas. Essa matriz possui uma particularidade, pois os componentes de transmissão exigem os mesmos requisitos de interfaces para os eixos que os componentes do grupo de fixação cubo-eixo. Isso acontece porque os componentes de transmissão sempre usam os mesmos componentes de fixação cubo-eixo, para que possam ser montados nos eixos. Nessa matriz, serão mostrados apenas os requisitos das interfaces que os componentes de transmissão exigem dos eixos, pois seus cubos usam componentes de fixação cubo-eixo padrão. Neste SE, considerou-se que os componentes de fixação cubo-eixo não sofrem nenhum

processo de fabricação que altere suas interfaces, isto é, são usados na forma em que são fornecidos.

Tabela 4-2: Matriz de dependência eixos X transmissão

	Transmissão com Bucha QD	Transmissão com Bucha TL	Transmissão com Anel Fixação	Transmissão com Chaveta
Barra Laminada				
Barra Trefilada				
Barra Retificada				
Tubo Mecânico				
Tubo Trefilado				

Fonte: Própria

Requisitos entre fixação cubo-eixo e transmissões.

A Tabela 4-3 mostra a matriz de dependência entre os grupos funcionais de transmissões, nas linhas, e fixação cubo-eixo, nas colunas. Essa matriz possui uma particularidade, já que todos os componentes de transmissão possuem um cubo que é usinado de acordo com os requisitos que as interfaces dos componentes de fixação cubo-eixo exigem. Nesta matriz, são mostrados apenas os requisitos das interfaces que os componentes de fixação cubo-eixo exigem dos cubos. Neste SE, considerou-se que os componentes de fixação cubo-eixo não sofrem nenhum processo de fabricação que altere suas interfaces, isto é, são usados na forma em que são fornecidos. Desta forma, os cubos não geram requisitos nos componentes que os fixam.

- *Bucha QD > Transmissão*: usinagem de um furo cônico com tolerância no diâmetro de $\pm 0,05\text{mm}$, com conicidade de $1,47^{\circ} \pm 2'$ e rugosidade de 3,2Ra. É necessário de 2 a 5 furos com rosca UNC para fixação reversa da bucha e de 2 a 5 furos passantes para fixação normal.
- *Bucha TL > Transmissão*: usinagem de um furo cônico com tolerância no diâmetro de $\pm 0,05\text{mm}$, com conicidade de $4^{\circ} \pm 2'$ e rugosidade de 3,2Ra. É necessário de 2 a 5 furos com rosca UNC para fixação da bucha e de 1 a 3 furos

sem rosca para sua extração. Nas buchas TL, a partir do tamanho 3535 há um rebaixo no furo de fixação para a cabeça do parafuso.

- *Anel de fixação > Transmissão*: em cubos estreitos, que possuem a largura do assento do anel, é necessário um furo passante com tolerância H9 ou melhor e rugosidade de 3,2Ra. Em cubos largos, é feito um rebaixo no cubo para alojar o anel com os mesmos requisitos de um cubo estreito. Na parte não rebaixada, o diâmetro com tolerância H9 e rugosidade de 12,5Ra.
- *Chaveta > Transmissão*: é necessário um furo com tolerância H7 e rugosidade de 3,2Ra. Para o canal de chaveta, uma tolerância entre JS9 e P9 na largura com rugosidade máxima de 3,2Ra, tolerância na profundidade de +0,1 a +0,3mm, dependendo do tamanho da chaveta, e rugosidade de 12,5Ra.

Tabela 4-3: Matriz de dependência fixação cubo-eixo X transmissão

	Bucha QD	Bucha TL	Anel Fixação	Chaveta
Transmissão, cubo de todas as polias e engrenagens				

Fonte: Própria

Requisitos entre fixação cubo-eixo e mancal.

Estes dois grupos não são montados entre si, portanto não existem requisitos de interface entre eles.

Requisitos entre eixo e mancal.

A Tabela 4-4 mostra a matriz de dependência entre os grupos funcionais de eixos e mancais. Nesta tabela pode ser observado que, em cada coluna, há vários rolamentos. Isto é possível pois os requisitos de suas interfaces são os mesmos.

Tabela 4-4: Matriz de dependência eixos X mancais

	Rolamentos							Buchas		
	Rígido de esfera, autocompensador de esfera e de rolo	Esfera de contato angular e rolo cônico	Autocompensador de esferas e rolos com bucha H	Autocompensador de esferas e rolos com bucha AH	Mancal de rolamento rígido de esferas Y com Bucha H	Mancal com rolamento autocompensador de esferas e de rolo com bucha H	Axial de esferas simples e de dupla carreira	Radial	Axial	Radial e axial
Barra Laminada										
Barra Trefilada										
Barra Retificada										
Tubo Mecânico										
Tubo Trefilado										

Fonte: Própria

- *Rolamentos rígidos de esfera, auto compensador de esfera e auto compensador de rolos > Barra laminada, trefilada, tubo mecânico e trefilado:* usinagem radial com tolerância no eixo que podem ir de um ajuste g6 para lado livre no eixo até n6 para rolamentos de esferas, e s6 para grandes rolamentos de rolo com ajuste fixo. A rugosidade para o eixo varia de 0,8 a 1,6Ra. Dependendo do projeto, pode ser necessário um rebaixo com encosto com rugosidade de 6,3Ra.
- *Rolamentos rígidos de esfera auto compensador de esfera e auto compensador de rolos > Barra retificada:* Dependendo da tolerância da barra e da necessidade do rolamento, podem ser montados diretamente. Eventualmente, pode ser necessário um rebaixo com usinagem radial com tolerância no eixo, que podem ir de um ajuste g6, para lado livre no eixo, até n6, para rolamentos de esferas, e s6, para grandes rolamentos de rolo com ajuste fixo. A rugosidade para o eixo varia de 0,8 a 1,6Ra. O encosto axial com rugosidade de 6,3Ra.
- *Rolamentos de esfera de contato angular e de rolo cônico > Barra laminada, trefilada, retificada, tubo mecânico e trefilado:* usinagem radial com tolerância no eixo que podem ir de um ajuste k6 até n6 para rolamentos de esferas, e s6 para grandes rolamentos de rolo. A rugosidade para o eixo varia de 0,8 a 1,6Ra. Dependendo do projeto o encosto pode ter rugosidade de 6,3Ra, quando não houver encosto pode ser necessário a usinagem de uma rosca para porca KM ou outro meio de fixação axial.
- *Rolamentos auto compensador de esfera, auto compensador de rolos com bucha H, mancal de rolamento rígido de esferas Y com bucha H, mancal com rolamento auto compensador de esfera e auto compensador de rolos com bucha*

- H* > Barra laminada, tubo mecânico e trefilado: usinagem radial com tolerância no eixo h9 ou melhor e rugosidade 3,2Ra ou melhor.
- *Rolamentos auto compensador de esfera e auto compensador de rolos com bucha H, mancal de rolamento rígido de esferas Y com bucha H, mancal com rolamento auto compensador de esfera e auto compensador de rolos com bucha H* > Barra laminada, tubo mecânico e trefilado: > Barra retificada e trefilada: podem ser montados diretamente sem nenhum processo para compatibilizar a interface.
 - *Rolamentos auto compensador de esfera e auto compensador de rolos com bucha AH* > Barra laminada, trefilada, retificada, tubo mecânico e trefilado: usinagem radial com tolerância melhor ou igual que h9. A rugosidade para o eixo melhor ou igual que 3,2Ra. O encosto pode ter rugosidade de 6,3Ra, deve ser previsto a usinagem de uma rosca para porca KM e um canal para fixar a arruela de trava, ou outro meio de fixação axial.
 - *Rolamento axial de esferas simples e de dupla carreira* > Barra laminada, trefilada, tubo mecânico e trefilado: a tolerância para ao assento radial no eixo pode usar uma tolerância j6 para simples, e k6 para dupla carreira. A rugosidade dos assentos axiais e radiais 3,2Ra. Para o rolamento de simples carreira com esforço axial de tração ou o rolamento de dupla carreira deve ser prevista a usinagem de uma rosca para porca KM para fixação axial ou outro meio de fixação.
 - *Rolamento axial de esferas simples e de dupla carreira* > Barra retificada: radialmente pode ser montado direto no eixo. A rugosidade dos assentos axiais pode ser 3,2Ra. Para o rolamento de simples carreira com esforço axial de tração ou o rolamento de dupla carreira deve ser prevista a usinagem de uma rosca para porca KM para fixação axial ou outro meio de fixação.
 - *Buchas radiais* > Barra laminada, trefilada, tubo mecânico e trefilado: a tolerância para os eixos com diâmetros menores que 80mm é f7 e os maiores h8, a rugosidade deve ser melhor ou igual a 3Rz.
 - *Buchas radiais* > Barra retificada: dependendo da tolerância da barra e do diâmetro do eixo podem ser montados direto, sem a necessidade de nenhum processo para compatibilizar a interface.

- *Buchas axiais > Barra laminada, trefilada, retificada, tubo mecânico e trefilado:* dependendo do projeto é necessário um rebaixo onde em sua superfície axial a rugosidade seja melhor ou igual a 3Rz.
- *Buchas radiais e axiais > Barra laminada, trefilada, tubo mecânico e trefilado:* a tolerância para os eixos com diâmetros menores que 80mm é f7 e os maiores h8, a rugosidade deve ser melhor ou igual a 3Rz. Dependendo do projeto é necessário um rebaixo onde em sua superfície axial a rugosidade seja melhor ou igual a 3Rz.
- *Buchas radiais e axiais > Barra retificada:* dependendo da tolerância da barra e do diâmetro do eixo, não é necessário de nenhum processo para compatibilizar a interface radialmente, apenas se o diâmetro interno da bucha for menor que o externo do eixo, neste caso será necessário um rebaixo onde a tolerância para os eixos com diâmetros menores que 80mm é f7 e os maiores h8. A superfície radial e a axial do encosto com rugosidade melhor ou igual a 3Rz.

5 VALIDAÇÃO DO MÉTODO

Neste capítulo o método proposto no capítulo 3, e montado no 4, é validado através da utilização do SE em dois casos exemplos. Em cada um destes casos foram feitos testes com projetistas experientes e novatos, fazendo o processo de seleção de componentes em ambos os casos de forma manual, e também com o uso deste software. O uso da ferramenta foi feito na fase de projeto detalhado onde já há dados suficientes sobre os requisitos de aplicação dos componentes, e principalmente dados para que o SE possa usar nos cálculos de dimensionamento. O objetivo é avaliar a eficiência e eficácia desta ferramenta.

Para que se possa validar o SE desenvolvido para a aplicação no processo de seleção de componentes mecânicos, este será aplicado em dois conjuntos utilizados em máquinas de processamento de papel, na fase de projeto preliminar e detalhado. Por uma questão de confidencialidade, não será apresentado o nome da empresa, constando apenas as informações necessárias dos conjuntos para a aplicação do SE e sua adequada compreensão e validação.

Como o SE está sendo aplicado em projetos existentes, seus resultados serão comparados com a solução atual. Do ponto de vista dos requisitos e do custo, será possível perceber qual é a melhor solução, se a atual ou a sugerida pelo SE. Pretende-se, também, com esta comparação, quantificar o quão melhor é a opção de componente sugerido pelo SE.

5.1 Aplicação do SE no cilindro gofrador de aço

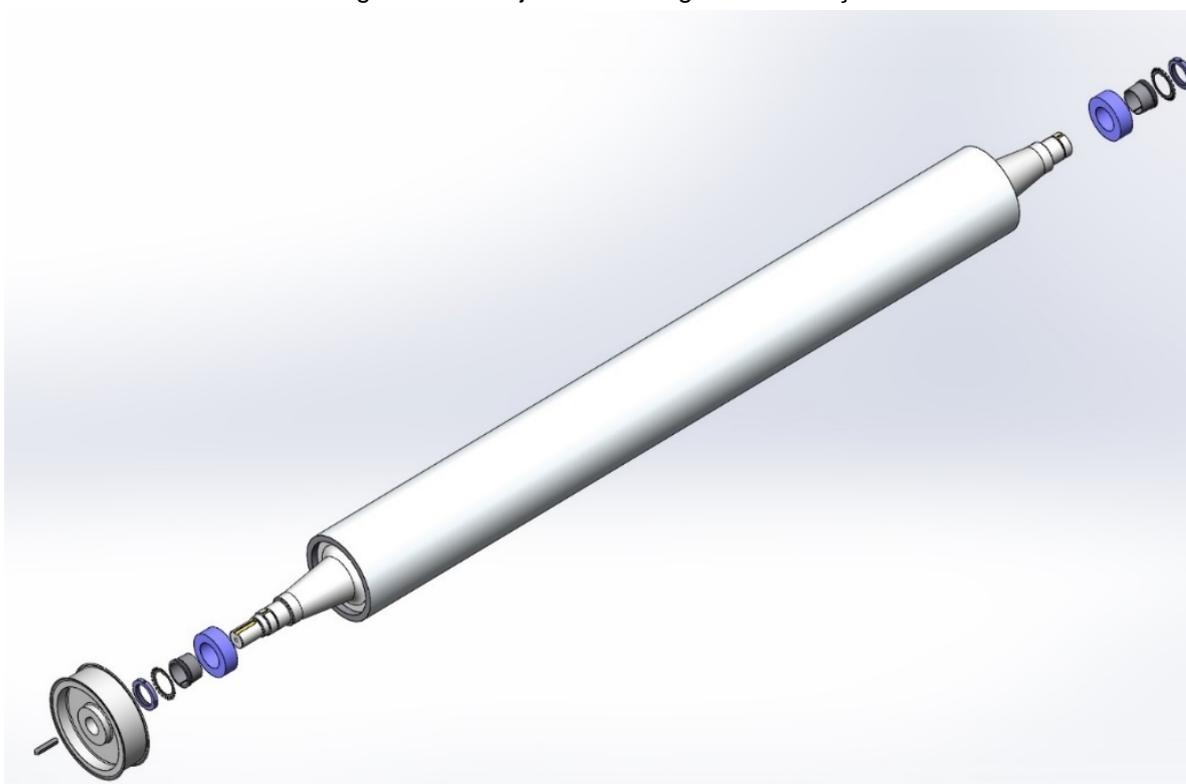
A fim de fornecer um aspecto mais sofisticado a produtos como papéis toalha, higiênicos e guardanapos, estes podem ser gofrados. Este processo consiste em adicionar desenhos em alto e baixo relevo ao papel. O processo é feito por uma máquina chamada gofrador, que pode ser uma máquina individual ou, em alguns casos, pode ser um módulo do desbobinador.

O gofrador consiste em um cilindro de aço que possui, gravado em sua superfície diametral, a forma negativa do desenho que se quer deixar em relevo no papel. Este cilindro trabalha junto a outro cilindro, que é revestido de borracha e trabalha solidário ao cilindro acionado. O processo de gofragem acontece quando o papel passa entre

o cilindro de aço e o cilindro de borracha, comprimindo-o entre estes cilindros, o que gera os desenhos em relevo no papel. O cilindro de borracha exerce pressão sobre o de aço por meio de um sistema que pode ser pneumático ou hidráulico, dependendo do tamanho do formato (largura do papel) e da velocidade da máquina.

A aplicação será feita apenas no conjunto cilindro de aço mostrado na Figura 5-1, para a seleção do componente de fixação cubo-eixo da polia de acionamento deste cilindro, e do travamento da porca de ajuste de folga do rolamento autocompensador de rolos deste cilindro.

Figura 5-1: Conjunto cilindro gofrador de aço



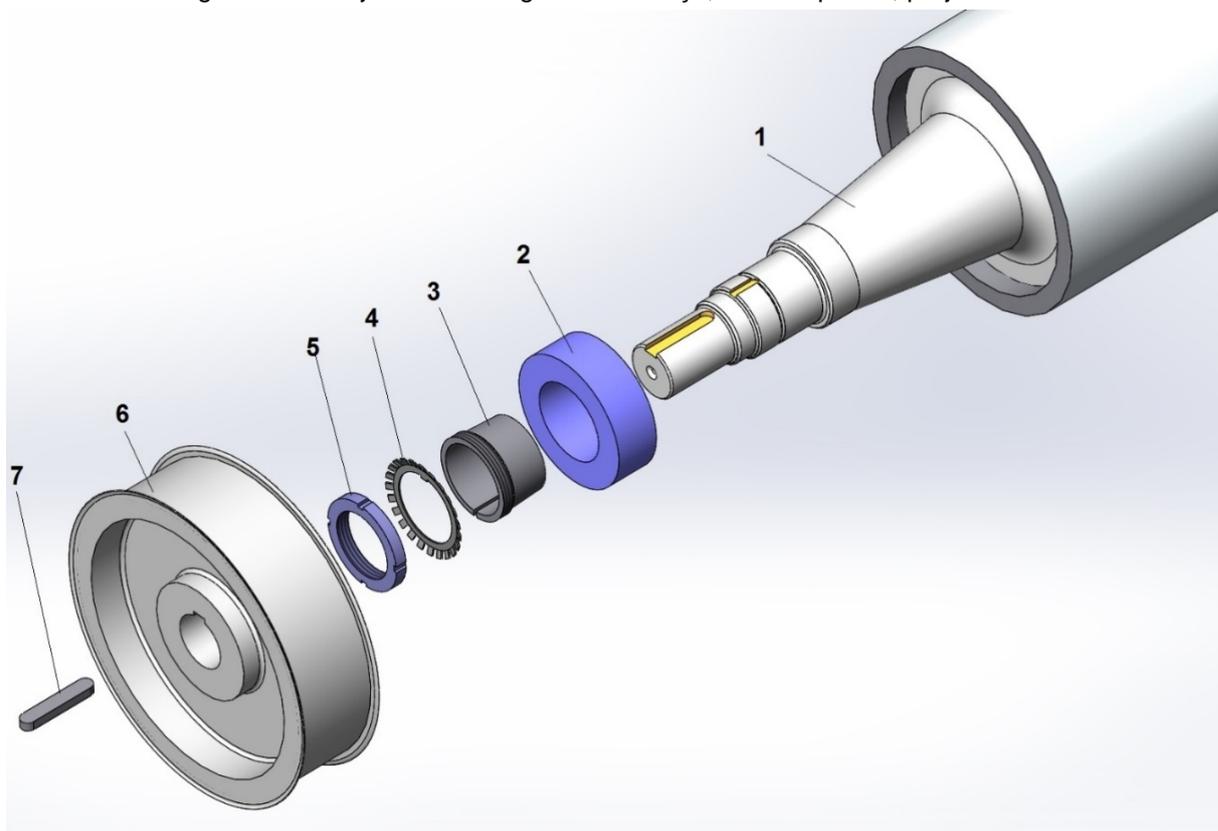
Fonte: Própria

Todos os componentes não envolvidos nesta análise específica, como o alojamento do rolamento, as tampas deste alojamento, e os retentores, serão suprimidos. Detalhes e dados técnicos que têm relevância tecnológica não serão mostrados, obedecendo à cláusula de confidencialidade imposta pelo fabricante.

Este conjunto, mostrado em maior detalhe na Figura 5-2, é composto por elementos de mancalização e transmissão, no lado esquerdo, e apenas por elementos de mancalização, no lado direito. Os cubos desta mancalização não são peças

comerciais, portanto não farão parte da análise. Cada componente numerado está descrito e especificado no texto. A transmissão é feita por componentes padronizados, respeitando três requisitos específicos: sincronismo, distâncias entre centros e trabalho sem lubrificação. Já que tais requisitos são cumpridos apenas por correias sincronizadas, não será necessário selecionar o elemento de transmissão.

Figura 5-2: Conjunto cilindro gofrador de aço, lado esquerdo, projeto atual



Fonte: Própria

De forma análoga, os mancais do rolamento autocompensador de rolos 23218K (2) montados em bucha de desmontagem AHX 3218 (3) também não devem ser alterados, pois é o único tipo de componente que atente aos requisitos desta aplicação (ser autocompensador, possuir elevada capacidade de carga e poder ser montado em bucha de desmontagem (3) com ajuste de folga).

Entretanto, a porca KM 17 (5), para a regulagem da folga do rolamento (2), e uma arruela de trava MB 17 (4), para o travamento da porca KM (5), podem ser substituídos por outros tipos de componentes padronizados com as mesmas funções. O uso de um tipo ou outro depende dos outros componentes do conjunto, baseado em uma análise do projetista e dos resultados das seleções feitas pelo SE. A folga entre os

elementos rolantes do rolamento (2) e seu anel externo é ajustada por um calibrador de lâminas e é específica para o tipo de carga, aplicação e velocidade. Tal calibração é feita por meio de uma chave de gancho na porca KM (5). A medida que se aperta a porca, verifica-se com o calibrador a folga no rolamento. Quando esta está na medida correta, um dos dentes da arruela de trava é amassado sobre um dos canais da porca, de forma que não se permita mais o seu giro. Assim evita-se que a porca, por efeito de vibração, possa se soltar, desajustando a folga do rolamento.

O acionamento é feito por um motor elétrico trifásico assíncrono com rotor de gaiola e potência de 22kW a 1765rpm e torque de 119,2Nm, controlado por um inversor de frequência vetorial não mostrados. O cilindro (1) gira em velocidade de 497,3rpm para uma velocidade nominal de processamento de papel a 500m/min. A rotação é ajustada pelo inversor para corrigir a diferença de relação de transmissão gerada pelas polias, para as rampas de aceleração e desaceleração, e a variação de velocidade entre estações em função do processo e do tipo de papel.

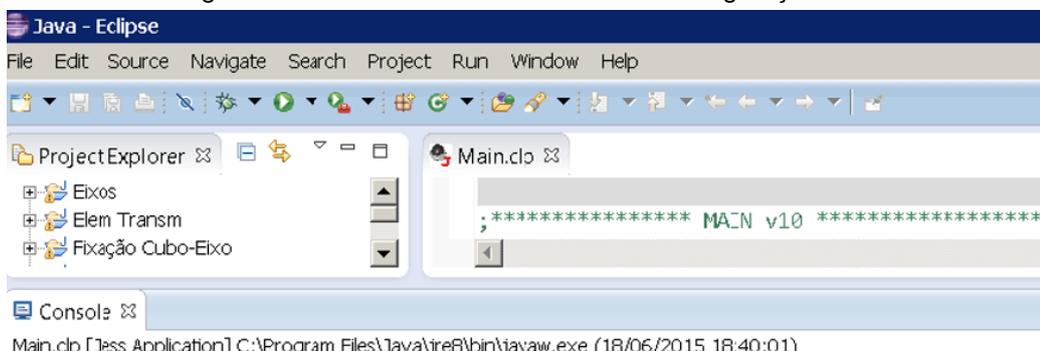
Considerando a velocidade do motor e o cilindro (1), há uma relação de transmissão de 1:3,5, que é feita por um par de polias confeccionadas em ferro fundido cinzento GG20, no caso a motora 32-8M-50 (32 dentes, passo 8mm e para correia de 50mm de largura) não mostradas, e a polia movida de 112-8M-50 (6), e correia sincronizadora GT3-2200-8MGT-50. Esta transmissão irá ampliar o torque no cilindro (1) para 417,2Nm, que é o torque que o elemento cubo-eixo, neste caso a chaveta na configuração atual, transmite. O diâmetro da ponta de eixo onde a polia é montada é de 65mm, o material é SAE 1045, o comprimento entre pontas do cilindro (1) é de 3620mm e seu peso 728kg.

Para que se possa verificar a efetividade do método, o SE será aplicado no processo de seleção do elemento de fixação cubo-eixo. Para um melhor entendimento de como funciona a ferramenta, o processo que é feito automaticamente pelo SE é mostrado passo a passo com as análises de custo dos componentes bem como os custos de compatibilização das interfaces, quando aplicável, e o custo logístico envolvido, quando necessário.

Para que o SE possa ser usado há uma sequência de passos que devem ser seguidos. Em primeiro lugar é necessário configurá-lo. Para isso, são inseridas as

informações relativas as diretrizes do projeto, os recursos de fabricação da planta, bem como os logísticos. A Figura 5-3, mostra a interface de entrada com as configurações. Estas informações sempre serão as mesmas desde que os projetos sejam executados na mesma planta, portanto a configuração é feita apenas uma vez na planta onde será feito o projeto. Na sequência, são informadas as diretrizes do projeto, os valores atribuídos a elas funcionam como pesos no processo de seleção priorizando um aspecto como o custo ou outro que possuir um valor alto atribuído pelo projetista. Sempre serão as mesmas para todo o projeto em questão, mesmo para a seleção de diferentes componentes pertencentes a diferentes conjuntos.

Figura 5-3 - Interface de entrada com as configurações



```
Java - Eclipse
File Edit Source Navigate Search Project Run Window Help
Project Explorer
  Eixos
  Elem Transm
  Fixação Cubo-Eixo
Main.clp
;***** MAIN v10 *****
Console
Main.clp [Jess Application] C:\Program Files\Java\jre8\bin\javaw.exe (18/06/2015 18:40:01)

Jess, the Rule Engine for the Java Platform
Copyright (C) 2008 Sandia Corporation
Jess Version 7.1p2 11/5/2008

CONFIGURAR O SISTEMA ESPECIALISTA? S

**---- DIRETRIZES DO PROJETO ----**

DFC (Design for cost): 10
DFA (Design for manufacturing): 10
DFA (Design for assembly): 7

**---- RECURSOS DE FABRICAÇÃO DISPONÍVEIS NA PLANTA ----**

Torno (Diâmetro x comprimento em mm): 1000 x 5200
Fresadora (Largura x, comprimento y, altura z em mm): 800 x 1500 x 700

**---- RECURSOS LOGÍSTICOS, DISTÂNCIA DA PLANTA ATÉ OS RECURSOS ----**

Torno (km): 8
Centro de usinagem (km): 8

QUAL GRUPO FUNCIONAL DESEJA SELECIONAR? FCE
```

Fonte própria.

Após configurado o SE o projetista seleciona o grupo funcional com o qual deseja trabalhar, neste caso fixação cubo eixo FCE. Então, o SE mostrará na interface de entrada uma tela com os requisitos de aplicação específicos para este grupo funcional. Na Figura 5-4 é mostrada esta tela, que já apresenta as respostas dadas às perguntas

feitas pelo SE. As perguntas que possuem unidades de medida deverão ser respondidas para que o SE dimensione o componente deste grupo e suas interfaces (o eixo e cubo), respeitando as restrições dimensionais dos mesmos. Os requisitos que foram respondidos com pesos (valores de 1 a 10) são usados pelo SE para o ranqueamento do componente mais adequado à aplicação.

Figura 5-4 - Interface de entrada requisitos de aplicação fixação cubo-eixo

```

Java - Eclipse
File Edit Source Navigate Search Project Run Window Help

ProjectExplorer
  Eixos
  Elem Transm
  Fixação Cubo-Eixo

Main.clp
  ***** MAIN v10 *****

Console
Main.clp [Jess Application] C:\Program Files\Java\jre8\bin\javaw.exe (18/06/2015 18:40:01)

**---- REQUISITOS DE APLICAÇÃO ----**

Grupo funcional: fixação cubo-eixo

Qual a tensão de escoamento da chaveta  $\sigma_{ch}$  (MPa)? 310
Qual a tensão de escoamento do eixo  $\sigma_{eixo}$  (MPa)? 310
Qual a tensão de escoamento do cubo  $\sigma_{cubo}$  (MPa)? 180
Qual o torque a ser transmitido T (Nm)? 417,2
Qual o diâmetro do eixo d onde é montado o elemento de fixação (mm)? 65
Qual o diâmetro do eixo (barra redonda)  $d_{eixo}$  (mm)? 75
Qual o diâmetro máximo (mm)? 320
Qual o comprimento total do eixo  $L_{eixo}$  (mm)? 3620
Qual a espessura da parede do eixo S se for um tubo (mm)? 0
Qual o diâmetro do cubo  $D_{cubo}$  (mm)? 110
Qual o comprimento do cubo  $L_{cubo}$  (mm)? 60
Qual o peso máximo (kg)? 728
Deverá permitir ajuste radial? 0
Deverá permitir ajuste axial? 0
O cubo deverá ter usinagem de baixa precisão? 10
O cubo deverá ter usinagem simples? 10
Eixo não deverá ter usinagem radial de precisão? 10
Eixo não deverá ter nenhuma usinagem? 0
Manutenção deverá ser rápida, de baixo custo e ferramental simples? 10
O cubo deverá ser compacto, pequeno diâmetro e inércia? 0
Deverá ter baixo custo? 10
É imprescindível disponibilidade/Logística? 8
Deve possibilitar absorção de sobrecarga? 0

```

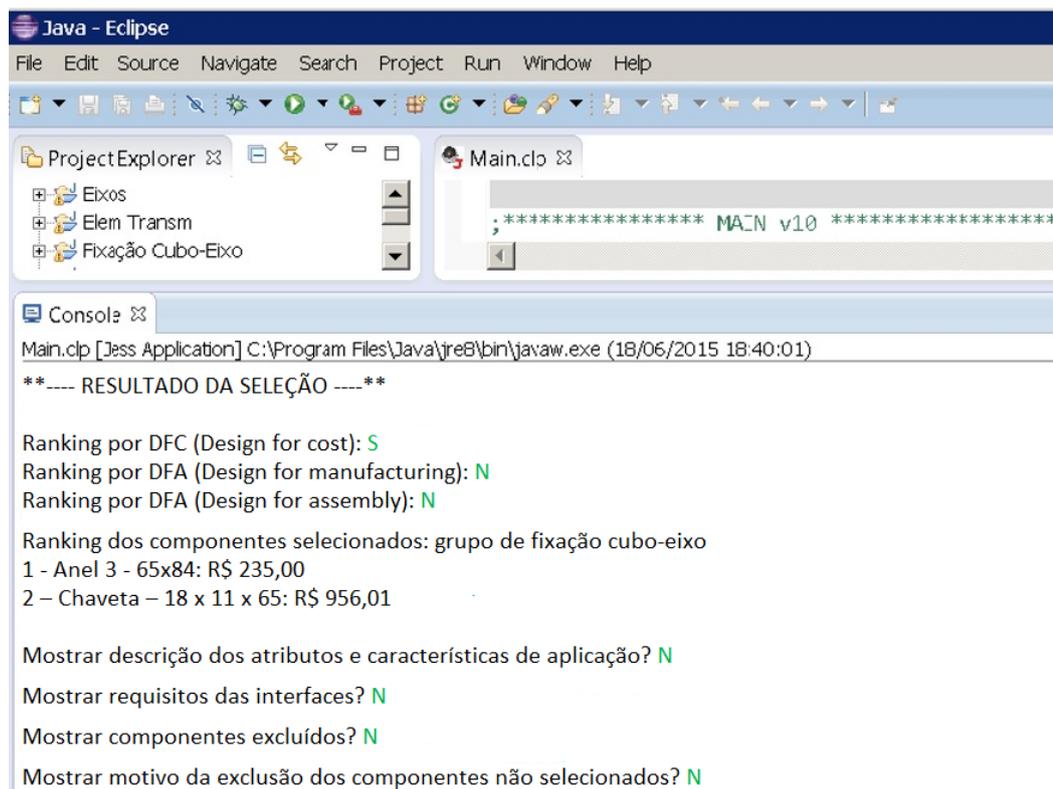
Fonte: Própria

De acordo com as diretrizes e os requisitos de aplicação informados, todos os elementos de fixação cubo-eixo deste SE atendem ao projeto, porém eles serão ranqueados, levando em consideração o seu custo, o custo de fabricação para compatibilizar a interface da peça onde serão montados, e, quando for o caso, o custo logístico envolvido. A lógica do *ranking* obedece a ordem do componente que

apresenta o menor custo combinado para o de maior custo. Além disto, deve ser o mais indicado para a aplicação, já que os requisitos informados com os maiores pesos ou graus de importância foram atendidos.

Os componentes ranqueados são mostrados na Figura 5-5, tela da interface de saída do SE. Nesta tela pode se observar o *ranking* dos componentes possíveis de serem usados, o seu tamanho, pois para este grupo funcional o SE os dimensiona, e também o preço que é estimado para este grupo funcional. Também pode ser visto que é possível ver os atributos e características de aplicação das alternativas possíveis de serem usadas, mas como foi respondido com não (N) não foi mostrado pelo SE. De forma análoga também pode ser visto os requisitos das interfaces, os componentes que foram excluídos e o motivo de sua exclusão.

Figura 5-5 - Interface de entrada requisitos de aplicação fixação cubo-eixo



Fonte: Própria

Quando o projetista quiser selecionar outro componente, volta até a tela da interface de entrada, e como o SE já foi configurado as perguntas relativas a este aspecto não aparecerão mais. O projetista responderá apenas à pergunta do tipo de grupo funcional que deseja escolher, e após sua resposta aparecerão as perguntas a

serem respondidas para que o SE possa fazer o processo de seleção novamente. Este ciclo é repetido na forma de um *looping* o número de vezes que o projetista desejar selecionar os componentes.

A seguir será detalhado o funcionamento do SE. Para isto serão usadas tabelas no lugar das telas do SE com todas as alternativas para detalhar os cálculos feitos, a seleção das alternativas, as dimensões dos componentes e as restrições das interfaces, entre outros.

Como o diâmetro onde os componentes serão montados foi informado nos requisitos de aplicação, o SE automaticamente os dimensiona. Por exemplo, como eixo tem diâmetro de 65mm, o SE consegue selecionar o tamanho da chaveta para ele, já que utiliza as informações obtidas da norma DIN 6885, armazenada em seu banco de dados. Nesse caso, a largura da chaveta será de 18mm, com altura de 11mm, profundidade do canal no eixo de 7mm e no cubo de 4,4mm.

Da mesma forma, o anel de fixação tipo 3, para este diâmetro de eixo, terá diâmetro externo de 84mm e comprimento mínimo do cubo para alojá-lo de 55mm, com uma capacidade de torque de 30470Nm.

O único componente que o SE dimensiona deste grupo funcional é o comprimento mínimo da chaveta. Por isso que é necessário informar a resistência do seu material (310MPa), do eixo (310MPa) e do cubo (180MPa). O SE irá calcular o comprimento pela condição mais crítica, que pode ser em função das tensões admissíveis na chaveta, no eixo ou o cubo. Além disto, deve ser também informado o torque a ser transmitido, neste caso 417,2Nm. A sua altura e largura são definidas em função do diâmetro do eixo, desta forma o SE pode dimensionar o comprimento da chaveta necessário para suportar o torque informado. Para o caso exemplo, o comprimento da chaveta deverá ter 65mm de comprimento. Os outros tipos de componentes têm suas dimensões definidas pelo diâmetro do eixo e o torque a ser transmitido. Estas dimensões constam no banco de dados do SE.

A primeira regra do processo de seleção é avaliar se todas as alternativas deste grupo podem ser aplicadas, atendendo aos requisitos de aplicação exigidos.

- 1 - IF** os componentes deste grupo são aplicáveis
AND todos os requisitos de aplicação que foram respondidos com valores entre 1 e 10, e tem índice de performance diferente de zero
THEN estes componentes são aplicáveis

Nesta etapa o SE fará um processo de eliminação das alternativas que não atendem a um determinado requisito de aplicação necessário. Além disto, irá fazer um pré-ranqueamento usando o método multicritério PROMETHEE-II. De acordo com as respostas do projetista, o ranking tem a seguinte ordem: chaveta, anel de fixação tipo 1, bucha TL, bucha QD, anel de fixação tipo 3, anel de fixação tipo 4.

- 2 - IF** os componentes deste grupo são aplicáveis
AND os componentes que tem capacidade de torque maior que a informada pelo projetista
THEN estes componentes são aplicáveis

Como o valor do torque informado a ser transmitido é 417,2Nm e a capacidade de todos os componentes deste grupo, como mostrado na tabela 6.2, é maior, então todos podem ser usados.

- 3 - IF** os componentes deste grupo são aplicáveis
AND as interfaces são dimensionalmente compatíveis
THEN estes componentes são aplicáveis

No caso estudado, o eixo (1) do cilindro não apresenta restrição dimensional, ou seja, a superfície de seu diâmetro onde os componentes são montados (sua interface) aceita todos os componentes do grupo. Porém, o cubo da polia (2), que é um componente padrão do fornecedor, tem 110mm de diâmetro e é feita de ferro fundido cinzento, com tensão de ruptura de 180 MPa. Esta polia deverá transferir um torque de 417,2Nm para o cilindro (1). Para tal, o SE calcula o diâmetro mínimo do cubo da polia (2) necessário para cada tipo de componente de fixação cubo-eixo. Assim, apenas o anel de fixação tipo 3 e a chaveta atendem a este requisito. O SE, portanto, ranqueia estes dois componentes.

A seguir, são feitas as análises de compatibilidade das interfaces de ambos os componentes, que, neste caso, se conectam com o eixo e com o cubo. No banco de

dados, existem regras específicas para cada possibilidade de acoplamento de cada componente pertencente a este grupo. Estas regras definem os requisitos das interfaces entre dois componentes e, através delas, o SE define quais processos de fabricação são necessários para tornar esta interface compatível, calculando o custo de fabricação desta compatibilização. A seguir, estas regras são apresentadas e o modo como o SE calcula este custo é demonstrado.

3.1 – IF o anel de fixação tipo 3 é montado no eixo

AND o diâmetro do eixo e do anel são diferentes

AND o eixo deve ter usinagem radial com precisão h9 e rugosidade de 3.2Ra

THEN existe compatibilidade parcial.

Para o cálculo do custo da *feature* de usinagem radial no anel tipo 3, o SE deve, primeiramente, calcular o volume desta *feature*. Neste caso, deve-se usinar o diâmetro de 75mm para 65mm, com comprimento de 80mm. Portanto, o volume desta usinagem será $87964,6\text{mm}^3$. Para que possa se acoplar ao eixo, o anel tipo 3 deve possuir uma tolerância h9, com rugosidade máxima de 3,2Ra. O custo de usinagem desta *feature* é obtido multiplicando-se o volume da *feature* pelo custo por volume. O custo por volume está no banco de dados do SE na forma de tabelas, que levam em consideração o material a ser usinado, a precisão e o tamanho necessário da máquina para usinar a peça. A tabela do ANEXO C: CUSTO DE USINAGEM BASEADO EM *FEATURES*. mostra o custo por volume. Neste caso, para uma usinagem com precisão h9, considerando o tamanho total do cilindro (diâmetro de 320mm e comprimento total de 3620mm) e material aço SAE 1045, o custo será de $\text{R}\$0,000010/\text{mm}^3$. Portanto, o custo de usinagem desta *feature* será de $\text{R}\$0,88$.

3.2 – SE o anel de fixação tipo 3 é montado no cubo

AND cubo deve ter usinagem radial do alojamento H9 e rugosidade de 3.2 μ Ra

THEN existe compatibilidade parcial

O custo da usinagem radial para o anel de fixação tipo 3 no cubo é calculado de forma análoga ao calculado para este componente no eixo, e será de $\text{R}\$0,61$.

3.3 – IF se a chaveta é montada no eixo

AND eixo deve ter usinagem radial com precisão k7 e rugosidade de 3,2Ra

AND eixo deve ter usinagem do canal de chaveta com precisão p9 e rugosidade de 3,2Ra

THEN existe compatibilidade parcial.

O custo da usinagem radial para a chaveta no eixo é calculado de forma análoga ao calculado para o anel de fixação tipo 3, e será de R\$0,86.

O volume da *feature* do canal de chaveta no eixo é 8548,9mm³. O custo de usinagem por volume para o fresamento do canal da chaveta no eixo, considerando uma precisão p9 em aço 1045, com uma fresadora capaz de comportar o cilindro, da tabela do ANEXO C: CUSTO DE USINAGEM BASEADO EM *FEATURES*., é de R\$0,000373/mm³. O custo de usinagem da *feature* do canal da chaveta no eixo será $8548,9 * 0,000373 = \$ 3,19$. Porém, como esta *feature* é específica apenas para este componente, é necessário adicionar o custo de setup da máquina, neste caso 1,5 horas que para uma fresadora com estas dimensões será de R\$385,00/h (vide ANEXO C: CUSTO DE USINAGEM BASEADO EM *FEATURES*.). Desta forma, o custo desta *feature* será $3,19 + 385,00 * 1,5 = R\$ 580,69$.

Como foi informado na interface de entrada, a fábrica tem um torno capaz de usinar este cilindro. Porém, se for usada uma chaveta o SE detectará que a fresadora da fábrica não comporta uma peça tão grande, pois extrapola as dimensões úteis que pode usinar. Assim, o canal de chaveta do cilindro precisa ser usinado em um fornecedor terceirizado, acarretando em um custo logístico. Neste caso, como a distância informada até o fornecedor deste serviço é de 8 km, o SE multiplica o percurso total (16km, ida e volta) pelo peso total do cilindro (728kg, Tabela 6-1) e pelo custo do frete, de R\$0,4375/kg/km (tabela B.2, do ANEXO B: CUSTOS LOGÍSTICOS, para distancias entre 1 e 50km). Desta forma, o custo logístico para terceirizar a usinagem do canal de chaveta será R\$ 318,50.

3.4 - IF a chaveta é montada no cubo

AND o cubo deve ter usinagem radial com precisão H7 e rugosidade de 3,2Ra

AND o cubo deve ter usinagem do canal de chaveta com precisão p9 e rugosidade de 3,2Ra

THEN existe compatibilidade parcial

O custo da usinagem radial do cubo é calculado pelo SE para o uso da chaveta, neste caso será de R\$0,86. O custo da usinagem do canal de chaveta no cubo é de R\$ 48,50. Como a polia (2) possui dimensões que a fresadora da fábrica pode usinar, não haverá custo logístico para este processo.

De acordo com as diretrizes de projeto e os requisitos de aplicação informados, todos os componentes de fixação cubo-eixo podem ser usados nesta aplicação. Porém, eles serão ranqueados levando em consideração o custo do componente, o custo de fabricação para tornar a sua interface compatível, o custo logístico (quando aplicável) e a compatibilidade dimensional da interface do componente selecionado com a peça onde será montado. A lógica do *ranking* obedece a ordem do componente que apresenta o menor custo combinado para o de maior custo. Estas informações são mostradas na Tabela 5-1.

Tabela 5-1: Ranqueamento dos componentes pelo SE

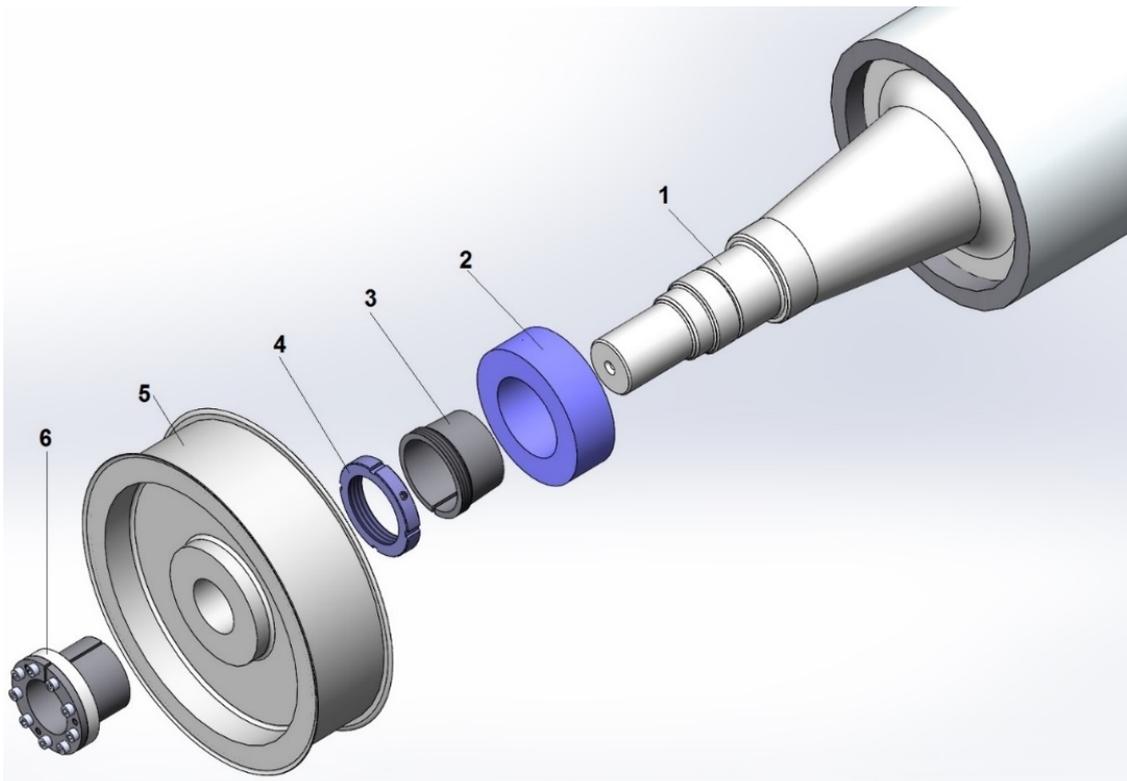
	Elemento de fixação cubo-eixo					
	Bucha QD	Bucha TL	Anel 1	Anel 3	Anel 4	Chaveta
Tipo / tamanho componente	E	3020	SIT 1-65x95	SIT 3-65x84	SIT 4-65x95	18x11
Capacidade do componente (Nm)	2260	2770	3040	3070	6750	1760
Diâmetro mín. do cubo (mm)	185	160	184	108	157	105
Comprimento mín. cubo / eixo (mm)	41,5 / 61,5	51	24	55 / 80	64	65
Custo do componente	169,45	193,69	93,52	233,51	321,60	6,60
Custo usinagem radial eixo (\$)	0,68	0,56	0,26	0,88	0,70	0,86
Custo usinagem radial cubo (\$)	49,50	40,90	0,26	0,61	0,70	0,86
Custo usinagem chaveta eixo (\$)	580,00	580,46	X	X	X	580,69
Custo usinagem chaveta cubo (\$)	X	X	X	X	X	48,50
Custo logístico para cilindro, chaveta (\$)	318,50	318,50	X	X	X	318,50
Custo: Componente + usinagens + logístico (\$)	1118,13	1134,11	94,04	235,00	323,00	956,01
Posição no ranking	X	X	X	1	X	2

Fonte: Própria

Como pode ser observado na Tabela 5-1, o SE irá ranquear o anel de fixação tipo 3 como o componente mais indicado para a aplicação e, em segundo lugar, a chaveta. As buchas QD, TL, anel tipo 1 e 3 não podem ser usados pois o SE detectou que exigem que a polia tenha um diâmetro de cubo maior que 110mm, portanto eliminando-os do ranqueamento por incompatibilidade no tamanho da interface. Este

resultado normalmente não seria o mesmo sem o uso do SE proposto, pois, o projetista inexperiente tende a considerar apenas o valor dos componentes, que neste caso são muito diferentes (o anel escolhido é 35,38 vezes mais caro que a chaveta). Porém, considerando os custos de compatibilização das interfaces e os custos logísticos, o anel tipo 3 selecionado pelo SE será 4,07 vezes mais barato que a chaveta usada atualmente. Além disto, o uso do anel tipo 3 simplifica e barateia o gerenciamento da produção, pois apenas um tipo de máquina é mobilizado para a usinagem do cilindro (o torno). Também dispensa o gerenciamento e os custos logísticos que a chaveta requer para a terceirização de sua usinagem. O tempo necessário para a produção do cilindro também é bem menor, já que todos os processos usados pela solução atual são em série, não podendo ser feitos em paralelo, pois um processo depende do outro. A Figura 5-6 mostra o projeto com o componente proposto pelo SE, o anel tipo 3 (6).

Figura 5-6: Conjunto cilindro gofrador de aço, lado esquerdo, projeto proposto



Fonte: Própria

Se o projetista for experiente, deverá considerar todos estes aspectos levados em conta por este SE e poderá chegar à mesma conclusão, mas irá gastar muito mais tempo, já que terá que fazer as pesquisas de preços dos componentes ou buscar tais

informações com o departamento de compras. Além disso, precisará fazer os cálculos para ver qual componente é possível de ser montado no cubo da polia. Deverá fazer o cálculo de estimativa de custo de usinagem para cada *feature* necessária para cada componente para tornar a interface compatível. Também deverá obter o valor do frete em R\$/kg/km e calcular, quando necessário, o valor do frete. Os preços neste SE podem ser atualizados por índices aplicados a determinados grupos funcionais, ou pode ser feita uma interface com um sistema ERP de forma que tenha seus preços sempre atualizados.

Como é possível observar, o SE consegue economizar muito tempo dos projetistas, que podem se dedicar a tarefas mais criativas ao invés de realizar cálculos e pesquisas que geralmente não são de seu domínio e envolvem outros profissionais. Além da rapidez no processo de seleção, elimina a chance de erros de cálculo ou o esquecimento de algum item de custo que pode fazer com que determinada escolha possa se tornar inviável na prática, comprometendo a competitividade do projeto.

Como pode ser observado na Tabela 6-2, o processo de fabricação do canal de chaveta (7) para fixar a polia (6) presente no projeto original adiciona um grande custo de fabricação e logístico. Porém, para travar a porca KM (5), o projeto original mostrado na Figura 5.2 usa uma arruela de trava MB (4), mas esta arruela também faz uso de um canal de chaveta na ponta de eixo do cilindro (1). A solução para eliminar totalmente a usinagem dos canais de chaveta é substituir a porca KM (5) e a arruela de trava MB que custam, somadas, R\$43,30, por uma porca do tipo KMP auto-travante (4), vista na configuração da Figura 5-6, que custa R\$145,37 e que não requer a arruela de trava (que também exige um canal de chaveta na ponta de eixo para ser travada). Desta forma, pode-se observar que o uso de componentes mais caros, como o anel tipo 3 (6) e a porca KMP (4) (que tem custo somado de R\$380,37), é mais vantajoso do ponto de vista do custo total, já que os componentes do projeto original (chaveta, porca KM e arruela de trava) custam R\$49,90, mas exigem um custo de fabricação e logístico de R\$949,41 (muito maior que o R\$1,49 necessário para compatibilizar as interfaces da solução proposta). Assim, a solução proposta na Figura 5-6, é 2,63 vezes mais barata que a solução do projeto original mostrada na Figura 5-2.

Para comparar o processo de seleção feito pelo SE com o feito manualmente pelos projetistas, foi proposto a seis projetistas realizar a seleção da mesma fixação cubo-eixo feita pelo ES, que foi descrita detalhadamente. Dos seis projetistas, três tinham mais de trinta anos de experiência em projeto de máquinas, enquanto os outros três ainda eram estagiários de engenharia. O objetivo deste experimento é aferir quanto tempo pode ser economizado com a utilização do ES, e se o resultado apresentado por ele é melhor ou o mesmo dos projetistas.

Para todos os processos de seleção manuais foram passadas todas as informações como catálogos e formulários para os dimensionamentos, de forma que os projetistas não tivessem seus tempos influenciados pela procura destas informações que dependendo da organização do ambiente podem consumir tempos muito diferentes, e poderia distorcer os resultados. Também foi fornecido uma folha com a sequência de cálculos necessários para cada alternativa e as fórmulas, além dos dados necessários contidos na

Tabela 5-1, e para um melhor entendimento da aplicação as Figura 5-1 e Figura 5-2. A Tabela 5-2 mostra os tempos gastos para o processo manual e com o uso do SE, por parte dos projetistas experientes e os novatos.

Tabela 5-2 - Tempos gastos para o processo manual e com o uso do SE, caso 1

Alternativas	Tempos em min. seleção manual - Fixação Cubo Eixo							Tempo de cálculo	Tempo p/ orçar	Tempo total
	Anel 1	Anel 3	Anel 4	Bucha QD	Bucha TL	Chaveta				
Projetista E1	12,0	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16,0	0,0	16,0	
Projetista E2	11,5	3,5	0,0	0,0	0,0	0,0	15,0	0,0	15,0	
Projetista E3	13,5	4,5	0,0	0,0	0,0	0,0	18,0	0,0	18,0	
Tempo médio	12,3	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16,3	0,0	16,3	
Projetista I1	8,5	6,3	0,0	4,6	5,5	14,3	39,2	150,0	189,2	
Projetista I2	6,8	5,4	0,0	3,5	3,8	12,6	32,1	180,0	212,1	
Projetista I3	7,0	6,5	0,0	4,0	3,9	13,3	34,7	240,0	274,7	
Tempo médio	7,4	6,1	0,0	4,0	4,4	13,4	35,3	190,0	225,3	
	Tempos em min. com o SE - Fixação Cubo Eixo 1-2									
Projetista E1								4,0		4,0
Projetista E2								3,2		3,2
Projetista E3								4,1		4,1
Tempo médio								3,8		3,8
Projetista I1								4,5		4,5
Projetista I2								4,7		4,7
Projetista I3								3,9		3,9
Tempo médio								4,4		4,4

Fonte: Própria

Considerando as informações iniciais, os projetistas experientes descartaram a escolha de componentes parcialmente compatíveis, que exigiriam algum processo de usinagem, já que sabem que isso tornaria o custo total maior. Portanto não consideraram, as buchas QD, TL e a chaveta. A seguir, sabendo que o Anel 1 seria a solução mais viável, começaram a dimensioná-lo, mas observaram que exigiria um cubo com diâmetro maior que o da polia a ser usada, portanto com interface de dimensão incompatível. Por causa disso, descartam a possibilidade de escolha do Anel 1. O anel 4 não foi cogitado porquê é similar ao 1, porém com maior capacidade de torque e também de maior custo. Então dimensionaram o Anel 3, que sabidamente exige cubos de menor diâmetro, e verificaram que é possível ser usado no cubo da polia a ser usada, sendo assim o componente escolhido para esta aplicação. Este retrabalho não aconteceria se usassem o SE.

Os projetistas inexperientes, precisaram dimensionar todos os componentes, e chegaram à conclusão que as buchas QD e TL e os anéis 1 e 4 exigem um diâmetro de cubo maior que o da polia que está sendo usada, assim estes componentes foram descartados como alternativas. Restaram como alternativas apenas o anel 3 e a chaveta, porém por inexperiência precisaram esperar os orçamentos do preço dos componentes e o custo de fabricação para a compatibilização das interfaces. Estas informações foram usadas para fazer a composição de custo destas alternativas e calcular a de menor custo neste caso o anel 3. Este processo manual levou a um tempo muito grande pela necessidade de calcular todas as alternativas e também pela espera dos orçamentos.

Um aspecto a ser considerado é que nenhum dos projetistas conheciam este SE, portanto se já tivessem tido experiência prévia os tempos seriam mais baixos no seu uso. Como pode ser observado na Tabela 5-2 o tempo médio usado pelos projetistas experientes foi 4,23 vezes maior que se usassem o SE. Os projetistas inexperientes usaram em média 51,20 vezes mais tempo fazendo o processo manualmente, que se usassem o SE. Um dos fatores que pesaram muito nestes tempos foi o tempo de espera dos orçamentos, e também pela inexperiência a necessidade de averiguar todas as alternativas. Considerando apenas os tempos de cálculo para os projetistas inexperientes fazerem o processo manualmente, tem se que este foi maior 8,02 vezes que se usassem o SE.

O tempo maior para a seleção do anel 1 em relação ao 3 se deve a análise inicial principalmente que os projetistas experientes fazem em relação a peça onde o componente será fixado e os recursos de fabricação disponíveis. Além disto, como o anel 1 é o primeiro a ser calculado, os subsequentes demoram menos pela prática de cálculo com o primeiro. Outro aspecto a ser levado em consideração é que os tempos empregados pelos projetistas experientes para a seleção do anel 1 em relação aos inexperientes foi maior, isto se deve ao fato de terem feito uma análise inicial baseada em sua experiência para que usassem o tempo para o dimensionamento apenas do componente que consideraram aplicável. Isto lhes poupou tempo como pôde ser observado em relação ao tempo total gasto para definir a melhor alternativa em relação aos inexperientes.

Outros aspectos a serem observados através da seleção feita pelo SE são: o uso de um processo de fabricação a menos, diminuição dos custos e do tempo de fabricação, menor custo de gerenciamento envolvido no processo de fabricação, menor número de componentes, menor custo de gerenciamento para compra e almoxarifado, diminuição do tempo de montagem.

5.2 Aplicação do SE no eixo de transmissão do desbobinador

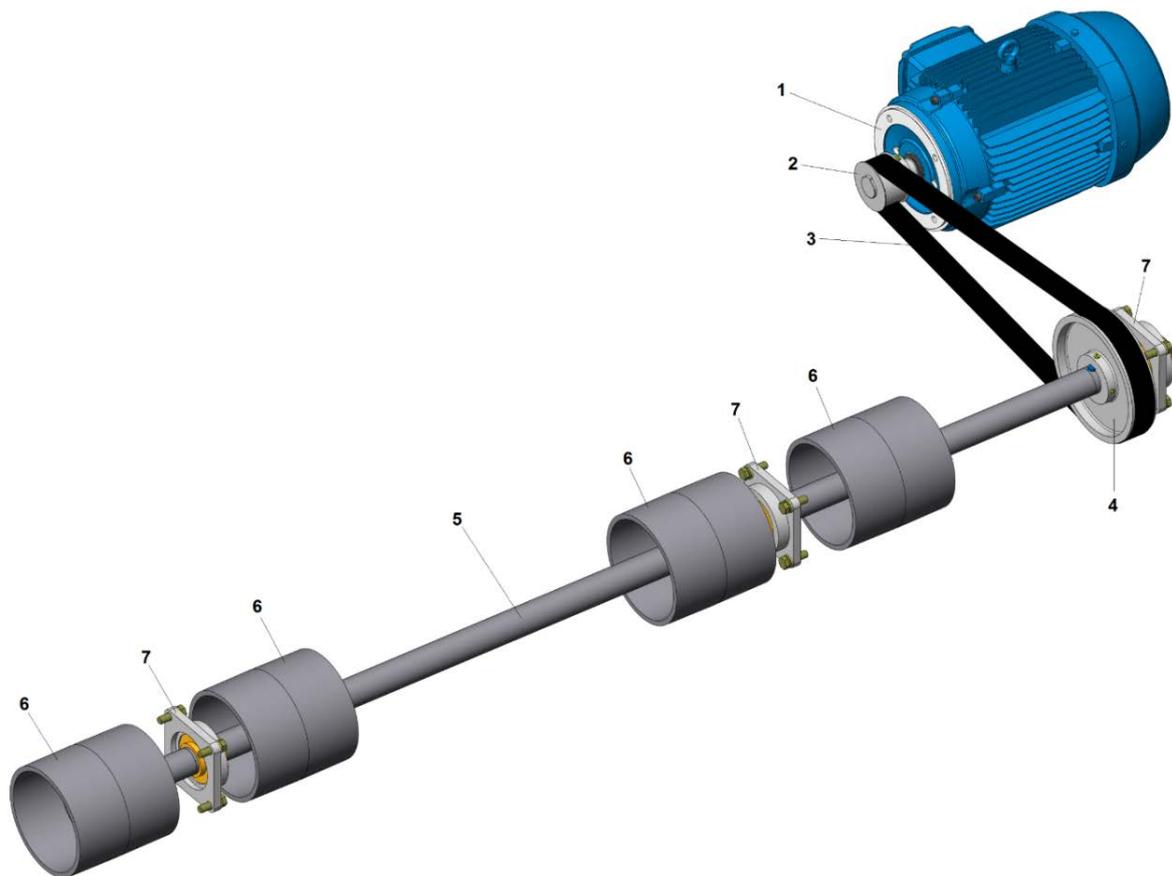
A segunda aplicação será feita em um equipamento chamado desbobinador, que pertence a mesma linha de produção do gofrador, visto na aplicação anterior. Este equipamento tem a função de desbobinar uma bobina de papel com 2000mm de diâmetro e 2800mm de comprimento. Após desbobinado, o papel passa pelo gofrador e, na sequência, pelo rebobinador, que gera pequenos rolos, chamados de log, com 100mm de diâmetro. A seguir, o log vai para o modulo colador de pontas, que aplica um adesivo na ponta final da folha, evitando que o log se desenrole. Na sequência o log vai para um pulmão, que balanceia a velocidade de produção dos equipamentos da linha. Depois, vai para o cortador de log, que o corta em comprimentos de 100mm e, a seguir, é enviado para as empacotadeiras, onde é embalado em fardos e está pronto para a distribuição aos consumidores.

O desbobinador faz com que a bobina gire, desenrolando o papel. Porém, o acionamento da bobina não pode ser feito pelo tubete central sobre o qual o papel foi enrolado. O acionamento é feito por meio de quatro correias planas que abraçam o

diâmetro externo da bobina. Isso é feito para que a velocidade de desbobinamento seja constante. Em geral, as bobinas são empilhadas para o seu armazenamento, criando deformações em seu diâmetro externo. Assim, se forem desbobinadas com acionamento pelo tubete central, as deformações provocam variações na velocidade de desbobinamento. Estas variações são indesejáveis na linha.

Nesta aplicação, os componentes que fazem parte do conjunto transmissão do desbobinador, mostrados na Figura 5-7, serão selecionados pelo SE que, portanto, deverá realizar a seleção dos componentes de transmissão, fixação cubo-eixo, mancalização e o eixo.

Figura 5-7: Conjunto transmissão do desbobinador, projeto atual



Fonte: Própria

Para um melhor entendimento, será feita a descrição do funcionamento deste conjunto. O acionamento é feito por um motor elétrico trifásico assíncrono com rotor de gaiola (1), com potência de 22kW a 1765rpm e torque de 119,2Nm, controlado por um inversor de frequência vetorial. A rotação é ajustada pelo inversor, responsável

pela aceleração e desaceleração do conjunto, além do controle da velocidade entre as máquinas em função do processo e do tipo de papel.

O torque do motor (1) é transferido ao eixo (5) por meio de uma polia motora (2) 40-8M-50 (40 dentes, passo 8mm, para correia de 50mm de largura) feita de ferro fundido nodular. Esta polia é fixada ao eixo do motor por meio de uma chaveta, que não entra na lista de materiais pois, como é fornecida montada no eixo do motor, considera-se que faz parte do motor. A fixação axial desta polia é feita por meio de dois parafusos prisioneiros DIN 916–M12x20 (8).

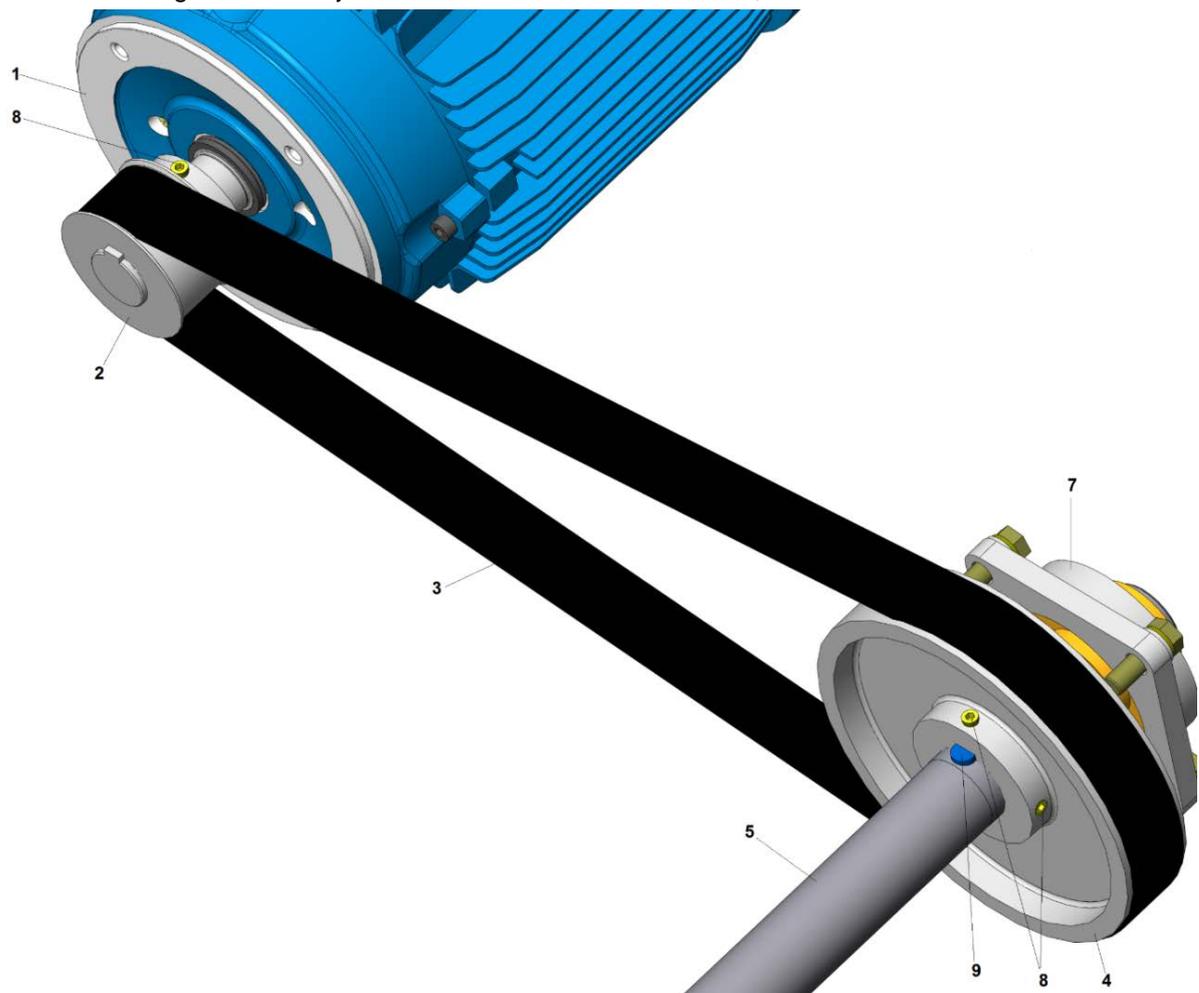
O torque é transferido da polia motora (2) para a polia movida (4) 112-8M-50, feita de ferro fundido cinzento, por meio de uma correia sincronizadora 2200-8MGT3-50 (3). A polia movida (4) é fixada ao eixo (5) por meio da chaveta DIN 6885-18x11x65mm (9) e de dois parafusos prisioneiros DIN 916–M12x20 (8), mostrados na Figura 5-8.

O eixo (5) é feito de uma barra redonda laminada de aço SAE 1045, usinado conforme a Figura 5-9, e é apoiado pelos mancais (7) compostos de uma caixa F212 e de um rolamento UC 212. Os mancais fixam-se axialmente por meio de dois prisioneiros, mas como são fornecidos como um componente único (caixa, rolamento e prisioneiros), não são considerados na lista de materiais.

As polias (2) e (4) são compradas apenas com um furo guia de 15mm de diâmetro e, portanto, são componentes de prateleira que sofrerão um processo de usinagem. O eixo (5) distribui o torque para as polias (6), que são fixadas por meio da chaveta DIN 6885-18x11x80mm (10), e por dois parafusos prisioneiros DIN 916–M16x20 (11), mostrados na Figura 5-10.

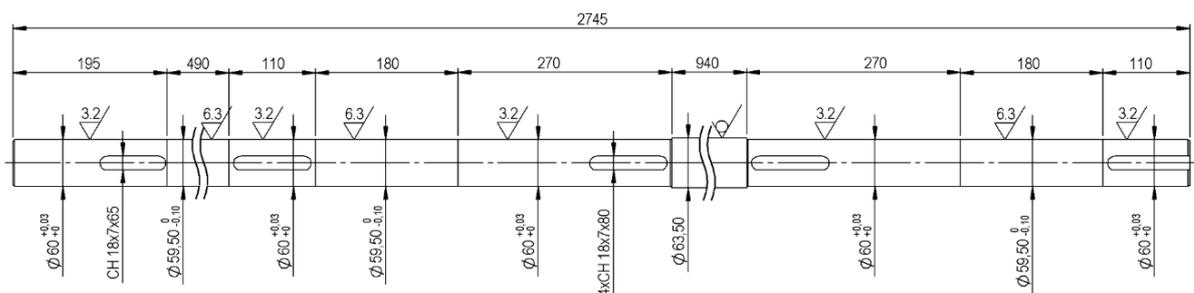
As polias (6) são peças específicas para o projeto e são fundidas em ferro fundido cinzento GG20, conforme desenho mostrado na Figura 5-11. Essas polias transferem o torque, na forma de força tangencial, para as correias planas Habasit S251H, não mostradas, que fazem a bobina girar a uma velocidade nominal tangencial e constante em seu diâmetro externo de 500m/min. Esta velocidade necessita de uma relação de transmissão entre as polias (2) e (4) de 1:2,8, influenciando a velocidade e o torque no eixo (5), que são, respectivamente, iguais a 630,36rpm e 333,76Nm.

Figura 5-8: Conjunto transmissão do desbobinador, detalhe da transmissão



Fonte: Própria

Figura 5-9: Eixo conjunto transmissão do desbobinador, projeto atual



Fonte: Própria

As diretrizes de projeto, os recursos de fabricação e os aspectos logísticos são os mesmos daqueles mostrados na seção 6.1 deste trabalho, já que o SE está sendo utilizado na mesma linha de processamento de papel e o projeto e execução são feitos na mesma planta. O projetista, portanto, deve selecionar, no SE, o grupo funcional com o qual deseja trabalhar. Neste caso, o primeiro grupo funcional a ser selecionado será o de transmissão.

- **Transmissão (3):**

Atualmente é feita por meio de uma correia sincronizada (3), de uma polia motora (2) e de uma polia movida (4). Assim, seleciona-se este grupo no SE, que apresenta uma tela com os requisitos de aplicação específicos para este grupo, mostrada na Tabela 5-3, com as perguntas que o projetista deverá responder. Neste grupo funcional, não foram desenvolvidos os recursos de dimensionamento, apenas a seleção por meio dos requisitos de aplicação e do custo.

Tabela 5-3: Requisitos de aplicação da transmissão (3)

Requisito de aplicação	Valor
Rotação da transmissão (rpm)?	1765
Potência da transmissão (Cv)?	30
É necessária sincronização?	10
É necessária ausência de lubrificação?	0
É necessário baixo peso e inércia?	0
É necessário que não haja alongação?	0
É necessária transmissão compacta?	0
São necessárias grandes relações de transmissão?	0
É necessário que os eixos estejam em planos diferentes?	0
São necessárias grandes distancias entre centros?	10
É necessário acionar vários eixos próximos uns dos outros?	0
É necessário acionar vários eixos distantes uns dos outros?	0
É necessário acionar vários eixos que giram em sentidos opostos?	0
É necessário suportar alta temperatura e produtos químicos?	0
É necessário flexibilidade de layout?	7
É imperativo facilidade logística e disponibilidade?	10
É imperativo que a manutenção seja simples e rápida?	10
É necessária baixa frequência de manutenção?	10
É necessário a função de absorção de choques?	0
É necessário funcionamento silencioso e com baixa vibração?	0
É necessário baixo carregamento nos mancais?	0
É imperativo o baixo custo?	7
É necessário alta confiabilidade?	8
É necessário alta eficiência?	8
É necessário alta rigidez?	0

Fonte: Própria

Considerando as respostas do projetista, a primeira regra do processo de seleção é avaliar se todas as alternativas deste grupo podem ser aplicadas, atendendo aos requisitos de aplicação exigidos.

1 - IF os componentes deste grupo são aplicáveis

AND todos os requisitos de aplicação que foram respondidos com valores entre 1 e 10, e tem índice de performance diferente de zero

THEN estes componentes são aplicáveis

Nesta etapa, o SE fará um processo de eliminação das alternativas que não atendem a um determinado requisito de aplicação. Além disto, irá fazer um pré-ranqueamento usando o método MCDM PROMETHEE-II. De acordo com as respostas do projetista, o ranking tem a seguinte ordem: correia sincronizada, correntes. As correias em V e micro V foram eliminadas do ranking pelo fato de terem índice de desempenho para sincronismo igual a zero. As engrenagens e coroa e 'sem fim' foram eliminadas pelo fato de terem índice de desempenho igual a zero para grandes distâncias entre centros. Além disso, o SE faz os cálculos para saber se os componentes atendem a relação CV/rpm em conformidade com os parâmetros obtidos nas tabelas F.1 a F.6 do ANEXO F: MATRIZES DE DECISÃO.

Neste caso exemplo, a transmissão mais indicada para esta aplicação específica é a correia sincronizada. Isto ocorre pelo fato de que seu score é mais elevado que o das correntes, principalmente por conta de aspectos relacionados à manutenção, além de uma pequena vantagem ponto de vista de custo, 14,13% em relação ao uso de uma transmissão por corrente. O conjunto correia 2200-8M-GT3-50, polia motora P40-8MGT-50 e movida P40-8MGT-112 custa R\$2562,05. O conjunto formado pela corrente 115-12B-2 (corrente DIN, 115 elos, dupla com passo $\frac{3}{4}$ "), o pinhão P25-12B-2 e a engrenagem P70-12B-2 custa R\$2924,08.

Outro aspecto a ser considerado no uso de correntes nestas velocidades é que implicam na construção de um porta-corrente, para que não haja respingos de lubrificantes no produto. Uma alternativa ao porta-corrente seria o uso de lubrificantes especiais de alta aderência, mas estes têm alto custo, como o Molikote MKL-N (400ml por R\$ 895,30) ou o Molysil Moto Spray (400ml por R\$ 271,04). Além do custo dos lubrificantes, também devem ser considerados os custos da equipe de manutenção

para relubrificação (e o conseqüente tempo de máquina parada), gerando assim um custo operacional mais alto. Além disso, como as correntes apresentam laceamento com o uso, faz-se necessário o uso de um esticador, mais caro, que possui uma mola, a fim de evitar a intervenção da equipe de manutenção para retencionamento. Como as máquinas operam 24h/dia, o ideal é o uso de componentes com baixa periodicidade de manutenção, neste caso, as correias sincronizadas. Observando a linha de produção como um todo, é possível notar que esta mesma correia é usada no gofrador e em duas transmissões do rebobinador. Tal fato diminui o custo relacionado às peças de reposição, simplificando seu gerenciamento.

- **Fixação cubo-eixo (1-2):**

É o componente que fixa, radialmente, a polia (2) ao eixo do motor (1). O projetista seleciona, no SE, o grupo funcional cubo-eixo e, a seguir, responde às perguntas dos requisitos de aplicação específicos para este grupo, mostradas na Tabela 5-4.

Tabela 5-4: Requisitos de aplicação fixação cubo-eixo 1-2

Requisitos de aplicação	Valor
Qual a tensão de escoamento da chaveta σ_{ch} (MPa)?	310
Qual a tensão de escoamento do eixo σ_{eixo} (MPa)?	310
Qual a tensão de escoamento do cubo σ_{cubo} (MPa)?	420
Qual o torque a ser transmitido T (Nm)?	119,2
Qual o diâmetro do eixo d onde é montado o elemento de fixação (mm)?	48
Qual o diâmetro do eixo (barra redonda) d_{eixo} (mm)?	48
Qual o diâmetro máximo (mm)?	48
Qual o comprimento total do eixo L_{eixo} (mm)?	110
Qual a espessura da parede do eixo S se for um tubo (mm)?	0
Qual o diâmetro do cubo D_{cubo} (mm)?	100
Qual o comprimento do cubo L_{cubo} (mm)?	60
Qual o peso máximo (kg)?	0
Deverá permitir ajuste radial?	0
Deverá permitir ajuste axial?	0
O cubo deverá ter usinagem de baixa precisão?	10
O cubo deverá ter usinagem simples?	10
Eixo não deverá ter usinagem radial de precisão?	10
Eixo não deverá ter nenhuma usinagem?	0
Manutenção deverá ser rápida, de baixo custo e ferramental simples?	10
O cubo deverá ser compacto, pequeno diâmetro e inércia?	0
Deverá ter baixo custo?	6
É imprescindível disponibilidade/Logística?	8
Deve possibilitar absorção de sobrecarga?	0

Fonte: Própria

Considerando as respostas do projetista, a primeira regra do processo de seleção é avaliar se todas as alternativas deste grupo podem ser aplicadas, atendendo aos requisitos de aplicação exigidos.

1 - IF os componentes deste grupo são aplicáveis

AND todos os requisitos de aplicação que foram respondidos com valores entre 1 e 10, e tem índice de performance diferente de zero

THEN estes componentes são aplicáveis

Nesta etapa, o SE fará um processo de eliminação das alternativas que não atendem a um determinado requisito de aplicação. Além disto, irá fazer um pré-ranqueamento usando o método MCDM PROMETHEE-II. De acordo com as respostas do projetista, o ranking tem a seguinte ordem: anel de fixação tipo 1, anel de fixação tipo 3, bucha TL, bucha QD, chaveta, anel de fixação tipo 4.

2 - IF os componentes deste grupo são aplicáveis

AND os componentes que tem capacidade de torque maior que a informada pelo projetista

THEN estes componentes são aplicáveis

Como o valor do torque informado a ser transmitido é 119,2Nm e a capacidade de todos os componentes deste grupo, como mostrado na Tabela 6.5, é maior, então todos podem ser usados.

3 - IF os componentes deste grupo são aplicáveis

AND as interfaces são dimensionalmente compatíveis

THEN estes componentes são aplicáveis

Porém, de acordo com a regra acima, a bucha QD e o anel de fixação tipo 4 não poderão ser usados, pois necessitam de um cubo com diâmetro maior que 100mm, que é o diâmetro do cubo da polia (2).

A Tabela 5-5 mostra o ranqueamento e os componentes possíveis de serem usados neste caso exemplo, de acordo com as diretrizes e os requisitos de aplicação informados.

Tabela 5-5: Ranqueamento do componente de fixação cubo-eixo 1-2

Tipo de componente	Elemento de fixação cubo-eixo 1-2					
	Bucha QD	Bucha TL	Anel 1	Anel 3	Anel 4	Chaveta
Tamanho componente	SK	2012	SIT 1-48x80	SIT 3-48x62	SIT 4-48x80	14x9x60
Capacidade do componente (Nm)	791	820	1700	2010	4000	908
Diâmetro mínimo do cubo (mm)	125	99	100	90	128	80
Comprimento mínimo cubo / eixo (mm)	32 / 47,5	31,8	24	45 / 70	64	60
Custo do componente	85,13	70,31	75,45	167,30	241,98	X
Custo usinagem radial eixo (\$)	X	X	X	X	X	X
Custo usinagem radial cubo (\$)	X	X	48,10	47,70	X	52,30
Custo usinagem chaveta eixo (\$)	X	X	X	X	X	X
Custo usinagem chaveta cubo (\$)	X	X	X	X	X	88,68
Custo logístico (\$)	X	X	X	X	X	X
Custo: Componente + usinagens + logístico (\$)	X	70,31	123,55	215,00	X	140,98
Posição no ranking	X	1	2	4	X	3

Fonte: Própria

Neste caso, deve-se levar em consideração que a polia, com bucha TL, pode ser comprada pronta e, portanto, não necessitam usinagem (nem no eixo do motor, que tem usinagem radial de precisão e canal de chaveta prontos). A chaveta não apresenta custo, já que é fornecida com o motor por padrão.

A seguir, o SE faz as análises de compatibilidade das interfaces dos componentes com o cubo da polia e o eixo. No banco de dados, existem regras específicas para cada possibilidade de acoplamento de cada componente pertencente a este grupo. Estas regras definem os requisitos das interfaces entre dois componentes e, através delas, o SE define quais processos de fabricação são necessários para tornar esta interface compatível, calculando o custo de fabricação desta compatibilização. A seguir, estas regras são apresentadas e o modo como o SE calcula este custo é demonstrado.

3.1 – SE o anel de fixação tipo 1 é montado no cubo

AND cubo deve ter usinagem radial do alojamento H9 e rugosidade de $3.2\mu\text{Ra}$

THEN existe compatibilidade parcial.

O volume de usinagem radial na polia, partindo de um furo guia de 15mm de diâmetro, é de 175178mm^3 . Os custos de remoção por volume e de setup são obtidos do ANEXO C: CUSTO DE USINAGEM BASEADO EM *FEATURES*. Portanto, para o anel tipo 1, o custo desta usinagem, de precisão h9, é de $\text{R}\$0,000010/\text{mm}^3$, considerando ferro fundido nodular GG40. O custo de remoção deste material será de $\text{R}\$ 2,10$. Além disto, soma-se, ao custo de remoção, mais 0,5hs de setup que, neste

caso, custará R\$ 46,00. Por fim, o custo deste processo será R\$ 48,10 para o anel de fixação tipo 1.

3.2 – SE o anel de fixação tipo 3 é montado no cubo

AND cubo deve ter usinagem radial do alojamento H9 e rugosidade de $3.2\mu Ra$

THEN existe compatibilidade parcial.

O custo da usinagem radial para o anel de fixação tipo 3 no cubo da polia (2), com volume de usinagem radial de 152319mm^3 , é calculado de forma análoga ao calculado para o anel de fixação tipo 1 e será de R\$ 47,83.

3.3 - IF a chaveta é montada no cubo

AND o cubo deve ter usinagem radial com precisão H7 e rugosidade de $3,2Ra$

AND o cubo deve ter usinagem do canal de chaveta com precisão p9 e rugosidade de $3,2Ra$

THEN existe compatibilidade parcial

O custo da usinagem radial para a chaveta no cubo da polia (2) com volume de usinagem radial de 130627mm^3 é calculado de forma análoga ao calculado para os anéis de fixação tipo 1 e 3, e será de R\$ 47,70.

O custo de usinagem do canal de chaveta na polia, com volume de usinagem de 4612mm^3 , considerando um custo de remoção por volume do canal de chaveta de $\text{R}\$0,000528/\text{mm}^3$, será de R\$2,43. No custo deste processo, soma-se 0,5hs de setup da fresadora, no valor de R\$ 86,25, acarretando em um custo de processo de R\$88,68. Neste conjunto, não haverá custos logísticos, já que as peças têm dimensões que podem ser usinadas pelas máquinas operatrizes da própria empresa.

Neste caso, é mais viável em primeiro lugar usar a bucha TL e, em segundo lugar, dispensar a chaveta que veio com o motor e usar o anel tipo 1, caso o projetista decida padronizar o uso apenas de anéis de fixação neste conjunto.

- **Fixação cubo-eixo (4-5):**

É o componente que fixa, radialmente, a polia (4) ao eixo (5). Neste processo de seleção, considerou-se que o eixo (5) é uma barra redonda laminada de 63,5mm. Assim, seleciona-se o grupo funcional cubo-eixo no SE, que apresenta uma tela com

os requisitos de aplicação específicos para este grupo, mostrada na Tabela 5-6, com as perguntas que o projetista deverá responder.

Tabela 5-6: Requisitos de aplicação fixação cubo-eixo (4-5).

Requisitos de aplicação	Valor
Qual a tensão de escoamento da chaveta σ_{ch} (MPa)?	310
Qual a tensão de escoamento do eixo σ_{eixo} (MPa)?	310
Qual a tensão de escoamento do cubo σ_{cubo} (MPa)?	180
Qual o torque a ser transmitido T (Nm)?	333,76
Qual o diâmetro do eixo d onde é montado o elemento de fixação (mm)?	60
Qual o diâmetro do eixo (barra redonda) d_{eixo} (mm)?	63,5
Qual o diâmetro máximo (mm)?	63,5
Qual o comprimento total do eixo L_{eixo} (mm)?	2745
Qual a espessura da parede do eixo S se for um tubo (mm)?	0
Qual o diâmetro do cubo D_{cubo} (mm)?	280
Qual o comprimento do cubo L_{cubo} (mm)?	60
Qual o peso máximo (kg)?	68,8
Deverá permitir ajuste radial?	0
Deverá permitir ajuste axial?	0
O cubo deverá ter usinagem de baixa precisão?	10
O cubo deverá ter usinagem simples?	10
Eixo não deverá ter usinagem radial de precisão?	10
Eixo não deverá ter nenhuma usinagem?	0
Manutenção deverá ser rápida, de baixo custo e ferramental simples?	10
O cubo deverá ser compacto, pequeno diâmetro e inércia?	0
Deverá ter baixo custo?	7
É imprescindível disponibilidade/Logística?	8
Deve possibilitar absorção de sobrecarga?	0

Fonte: Própria

Considerando as respostas do projetista neste caso, a primeira regra do processo de seleção é avaliar se todas as alternativas deste grupo podem ser aplicadas, atendendo aos requisitos de aplicação exigidos.

1 - IF os componentes deste grupo são aplicáveis

AND todos os requisitos de aplicação que foram respondidos com valores entre 1 e 10, e tem índice de performance diferente de zero

THEN estes componentes são aplicáveis

Nesta etapa, o SE fará um processo de eliminação das alternativas que não atendem a um determinado requisito de aplicação necessário. Além disto, irá fazer um

pré-ranqueamento usando o método MCDM PROMETHEE-II. De acordo com as respostas do projetista o ranking tem a seguinte ordem: anel de fixação tipo 1, anel de fixação tipo 3, bucha TL, bucha QD, chaveta, anel de fixação tipo 4.

2 - IF os componentes deste grupo são aplicáveis

AND os componentes que tem capacidade de torque maior que a informada pelo projetista

THEN estes componentes são aplicáveis

Como o valor do torque informado a ser transmitido é 333,76Nm e a capacidade de todos os componentes deste grupo, como mostrado na tabela 6.7, é maior, então todos podem ser usados.

3 - IF os componentes deste grupo são aplicáveis

AND as interfaces são dimensionalmente compatíveis

THEN estes componentes são aplicáveis

Porém, de acordo com a regra acima, a bucha QD e o anel de fixação tipo 4 não poderão ser usados, pois necessitam de um cubo com diâmetro maior que 100mm, que é o diâmetro do cubo da polia (2). Como a polia (4) pode ser comprada de prateleira sólida, isto é, sem alívio de material, o diâmetro do cubo é o diâmetro da polia. Por isto, na polia (4), o diâmetro do cubo é considerado como 280mm.

A Tabela 5-7 mostra o ranqueamento e os componentes possíveis de serem usados neste caso exemplo, de acordo com as diretrizes e os requisitos de aplicação informados.

Tabela 5-7: Ranqueamento da fixação cubo-eixo (4-5) em uma barra redonda laminada.

Tipo de componente	Elemento de fixação cubo-eixo 4-5					
	Bucha QD	Bucha TL	Anel 1	Anel 3	Anel 4	Chaveta
Tamanho componente	E	3020	SIT 1-60x90	SIT 3-60x77	SIT 4-60x90	18x11x60
Capacidade do componente (Nm)	2260	2770	2474	2840	6200	415
Diâmetro mínimo do cubo (mm)	185	160	163	101	153	96
Comprimento mínimo cubo / eixo (mm)	41,5 / 66,5	50,8	24	55 / 80	64	60
Custo do componente	169,45	163,69	91,62	233,51	292,73	6,60
Custo usinagem radial eixo (\$)	100,23	100,17	100,22	100,27	X	110,22
Custo usinagem radial cubo (\$)	X	X	48,44	48,60	X	52,35
Custo usinagem chaveta eixo (\$)	90,10	89,76	X	X	X	89,99
Custo usinagem chaveta cubo (\$)	X	X	X	X	X	88,50
Custo logístico (\$)	X	X	X	X	X	X
Custo: Componente + usinagens + logístico (\$)	359,78	353,62	240,28	382,38	X	347,66
Posição no ranking por custo	4	3	1	5	X	2

Fonte: Própria

Como pode ser observado, o anel tipo 4 não pode ser usado pois exige um cubo mais longo que o disponível nesta polia. A polia (2) pode ser comprada pronta para ser usada com as buchas QD e TL e, portanto, não necessita de usinagem em seu cubo.

A seguir, o SE faz as análises de compatibilidade das interfaces dos componentes com o cubo da polia e o eixo.

3.1 – SE o anel de fixação tipo 1 é montado no cubo

AND cubo deve ter usinagem radial do alojamento H9 e rugosidade de $3.2\mu\text{Ra}$

THEN existe compatibilidade parcial.

O volume de usinagem radial, partindo de um furo guia de 15mm de diâmetro na polia, é de 243866mm^3 . Os custos de remoção por volume e de setup são obtidos do ANEXO C: CUSTO DE USINAGEM BASEADO EM *FEATURES*.. Portanto, para o anel tipo 1, o custo desta usinagem, de precisão h9, é de $\text{R}\$0,000010/\text{mm}^3$, considerando ferro fundido nodular GG40. O custo de remoção deste material será de $\text{R}\$ 2,44$. Além disto, soma-se, ao custo de remoção, mais 0,5hs de setup que, neste caso, será de $\text{R}\$ 46,00$. Por fim, o custo deste processo será de $\text{R}\$ 48,44$ para o anel de fixação tipo 1.

3.2 – SE o anel de fixação tipo 3 é montado no cubo

AND cubo deve ter usinagem radial do alojamento H9 e rugosidade de $3.2\mu\text{Ra}$

THEN existe compatibilidade parcial.

O custo da usinagem radial para o anel de fixação tipo 3 no cubo da polia (2), com volume de usinagem radial de 259649mm^3 , é calculado de forma análoga ao calculado para o anel de fixação tipo 1 e será de $\text{R}\$ 48,60$.

3.3 - IF a chaveta é montada no cubo

AND o cubo deve ter usinagem radial com precisão H7 e rugosidade de $3,2\text{Ra}$

AND o cubo deve ter usinagem do canal de chaveta com precisão p9 e rugosidade de $3,2\text{Ra}$

THEN existe compatibilidade parcial

O custo da usinagem radial para a chaveta no cubo da polia (2), com volume de usinagem radial de 159043mm^3 e precisão H7, é de $\text{R}\$0,000011/\text{mm}^3$, considerando ferro fundido nodular GG40. O custo de remoção deste material será de $\text{R}\$ 1,75$. Além disto, soma-se, ao custo de remoção, mais 0,5hs de setup que, neste caso, será de $\text{R}\$50,60$. Por fim, o custo deste processo será de $\text{R}\$ 52,35$ para a chaveta.

O custo de usinagem do canal de chaveta na polia, com volume de usinagem de 5245mm^3 , considerando o custo de remoção por volume do canal de chaveta de $0,00043\text{R}\$/\text{mm}^3$, será de $\text{R}\$2,25$. Além disso, considera-se um tempo de setup de fresadora de 0,5hs, que custa $\text{R}\$86,25$. O valor total do processo é de $\text{R}\$88,50$.

3.4 – IF bucha QD é montada no eixo

AND o diâmetro do eixo e da bucha são diferentes

AND o eixo deve ter usinagem radial com precisão h9 e rugosidade de 3.2Ra

AND o eixo deve ter usinagem do canal de chaveta com precisão P9 e rugosidade de 3,2Ra

THEN existe compatibilidade parcial.

O eixo (barra redonda laminada) deve sofrer uma usinagem radial, reduzindo seu diâmetro bruto de 63,5mm para 60mm. Considerando que o custo, para uma precisão de h9, é de $\text{R}\$0,000010/\text{mm}^3$ em aço SAE 1045 e que é necessário um tempo de 0,5h de setup (no valor de $\text{R}\$100,00$), o custo deste processo será de $\text{R}\$100,23$.

O custo de usinagem do canal da chaveta no eixo considera um volume a ser usinado de 9349mm^3 (com um custo de usinagem de $\text{R}\$0,00016/\text{mm}^3$ para aço SAE 1045 e precisão P9) e 0,5h de setup (no valor de $\text{R}\$ 88,50$). Como a capacidade da fresadora é menor que o eixo, porém como este é leve podem ser feitos os canais de chaveta em duas operações na mesma máquina, portanto não sendo necessário terceirizar o processo e também evitando o custo logístico. Assim o custo de usinagem do canal da chaveta no eixo para a bucha QD será de $\text{R}\$ 90,10$.

3.5 – IF bucha TL é montada no eixo

AND o diâmetro do eixo e da bucha são diferentes

AND o eixo deve ter usinagem radial com precisão h9 e rugosidade de 3.2Ra

AND o eixo deve ter usinagem do canal de chaveta com precisão P9 e rugosidade de 3,2Ra

THEN existe compatibilidade parcial.

O custo da usinagem radial da bucha TL no eixo será de R\$100,17. O custo de usinagem do canal da chaveta no eixo para a bucha TL será de R\$89,76.

3.6 – IF o anel de fixação tipo 1 é montado no eixo

AND o diâmetro do eixo e do anel são diferentes

AND o eixo deve ter usinagem radial com precisão h11 e rugosidade de 3.2Ra

THEN existe compatibilidade parcial.

O custo da usinagem radial anel de fixação tipo 1 no eixo será de R\$ 100,22.

3.7 – IF o anel de fixação tipo 3 é montado no eixo

AND o diâmetro do eixo e do anel são diferentes

AND o eixo deve ter usinagem radial com precisão h9 e rugosidade de 3.2Ra

THEN existe compatibilidade parcial.

O custo da usinagem radial anel de fixação tipo 3 no eixo será de R\$ 100,27.

3.8 – IF chaveta é montada no eixo

AND o diâmetro do eixo e da bucha são diferentes

AND o eixo deve ter usinagem radial com precisão h9 e rugosidade de 3.2Ra

AND o eixo deve ter usinagem do canal de chaveta com precisão P9 e rugosidade de 3,2Ra

THEN existe compatibilidade parcial.

O custo da usinagem radial da chaveta no eixo será de R\$ 110,22. O custo de usinagem do canal da chaveta no eixo será de R\$ 89,99.

A Tabela 5-8 mostra o processo de seleção do componente de fixação cubo-eixo (4-5) feito pelo SE. Porém, considera-se que o eixo (5) é uma barra redonda trefilada h9 de aço SAE 1045, que não exige usinagem radial.

Como pode ser observado na Tabela 5-7 (para barra laminada) e na Tabela 5-8 (barra trefilada h9), a ordem das alternativas ranqueadas é a mesma. A barra trefilada h9 dispensa o processo de usinagem radial para todos os componentes deste grupo. Analisando a Tabela 5-8, conclui-se que o anel tipo 1, apesar de ser mais caro do que

a chaveta, é a solução mais econômica, em função dos custos associados aos processos de fabricação necessários à utilização destes componentes.

Tabela 5-8: Ranqueamento do componente de fixação cubo-eixo (4-5) em uma barra redonda trefilada h9.

Tipo de componente	Elemento de fixação cubo-eixo 4-5					
	Bucha QD	Bucha TL	Anel 1	Anel 3	Anel 4	Chaveta
Tamanho componente	E	3020	SIT 1-60x90	SIT 3-60x77	SIT 4-60x90	18x11x60
Capacidade do componente (Nm)	2260	2770	2474	2840	6200	415
Diâmetro mínimo do cubo (mm)	185	160	163	101	153	96
Comprimento mínimo cubo / eixo (mm)	41,5 / 66,5	50,8	24	55 / 80	64	60
Custo do componente	169,45	163,69	91,62	233,51	292,73	6,60
Custo usinagem radial eixo (\$)	X	X	X	X	X	X
Custo usinagem radial cubo (\$)	X	X	48,44	48,60	X	52,35
Custo usinagem chaveta eixo (\$)	90,10	89,76	X	X	X	89,99
Custo usinagem chaveta cubo (\$)	X	X	X	X	X	88,50
Custo logístico (\$)	X	X	X	X	X	X
Custo: Componente + usinagens + logístico (\$)	259,55	253,45	140,06	282,11	X	237,44
Posição no ranking por custo	4	3	1	5	X	2

Fonte: Própria

- **Fixação cubo-eixo (5-6):**

É o componente que fixa, radialmente, a polia (6) ao eixo (5). A polia (6) é uma peça fundida feita especificamente para esta máquina e pode moldar-se a qualquer tipo de componente para fixá-la ao eixo. Como todos os requisitos de aplicação a serem respondidos para o SE são os mesmos do componente de fixação cubo-eixo (4-5), com exceção do torque de 333,76Nm e do comprimento do cubo de 80mm de comprimento, não será mostrada novamente a tela de entrada dos requisitos de aplicação. Assim, será mostrada apenas a Tabela 5-9 do processo de seleção do SE usando o material atual (barra redonda laminada de aço SAE 1045 com de 63,5mm).

Tabela 5-9: Ranqueamento do componente de fixação cubo-eixo (5-6) em uma barra redonda laminada.

Tipo de componente	Elemento de fixação cubo-eixo 5-6					
	Bucha QD	Bucha TL	Anel 1	Anel 3	Anel 4	Chaveta
Tamanho componente	E	3020	SIT 1-60x90	SIT 3-60x77	SIT 4-60x90	18x11x80
Capacidade do componente (Nm)	2260	2770	2474	2840	6200	992
Diâmetro mínimo do cubo (mm)	185	160	163	101	153	96
Comprimento mínimo cubo / eixo (mm)	41,5 / 66,5	50,8	24	55 / 80	64	60
Custo do componente	169,45	163,69	91,62	233,51	292,73	6,60
Custo usinagem radial eixo (\$)	100,23	100,17	100,27	100,27	100,27	110,27
Custo usinagem radial cubo (\$)	49,57	51,22	49,66	49,79	51,18	48,69
Custo usinagem chaveta eixo (\$)	90,10	89,76	X	X	X	89,99
Custo usinagem chaveta cubo (\$)	X	X	X	X	X	88,50
Custo logístico (\$)	X	X	X	X	X	X
Custo: Componente + usinagens + logístico (\$)	409,35	404,84	241,55	383,57	444,18	344,05
Posição no ranking por custo	5	4	1	3	6	2

Fonte: Própria

A Tabela 5-10 mostra o mesmo processo, porém usando, no eixo (5), uma barra redonda retificada h7 de aço SAE 1045, que não necessita de usinagem radial. Como pode ser observado na Tabela 5-9 (barra laminada) e na Tabela 5-10 (barra retificada), a ordem das alternativas ranqueadas é a mesma. Conclui-se que o anel tipo 1, apesar de ser mais caro do que a chaveta, é a solução mais econômica, em função dos custos associados aos processos de fabricação necessários à utilização destes componentes.

Tabela 5-10: Ranqueamento do componente de fixação cubo-eixo (5-6) em uma barra redonda retificada.

Tipo de componente	Elemento de fixação cubo-eixo 5-6					
	Bucha QD	Bucha TL	Anel 1	Anel 3	Anel 4	Chaveta
Tamanho componente	E	3020	SIT 1-60x90	SIT 3-60x77	SIT 4-60x90	18x11x80
Capacidade do componente (Nm)	2260	2770	2474	2840	6200	992
Diâmetro mínimo do cubo (mm)	185	160	163	101	153	96
Comprimento mínimo cubo / eixo (mm)	41,5 / 66,5	50,8	24	55 / 80	64	60
Custo do componente	169,45	163,69	91,62	233,51	292,73	6,60
Custo usinagem radial eixo (\$)	X	X	X	X	X	X
Custo usinagem radial cubo (\$)	49,57	51,22	49,66	49,79	51,18	48,69
Custo usinagem chaveta eixo (\$)	90,10	89,76	X	X	X	89,99
Custo usinagem chaveta cubo (\$)	X	X	X	X	X	88,50
Custo logístico (\$)	X	X	X	X	X	X
Custo: Componente + usinagens + logístico (\$)	309,12	304,67	141,28	283,30	343,91	233,78
Posição no ranking por custo	5	4	1	3	6	2

Fonte: Própria

- **Eixo (5):**

O projetista seleciona o grupo funcional eixos no SE e responde às perguntas dos requisitos de aplicação, mostradas na Tabela 5-11, para que possam ser selecionadas e ranqueadas as melhores alternativas para esta aplicação.

Considerando as respostas do projetista, a primeira regra do processo de seleção é avaliar se todas as alternativas deste grupo podem ser aplicadas, atendendo aos requisitos de aplicação exigidos.

1 - IF os componentes deste grupo são aplicáveis

AND todos os requisitos de aplicação que foram respondidos com valores entre 1 e 10, e tem índice de performance diferente de zero

THEN estes componentes são aplicáveis

Tabela 5-11: Requisitos de aplicação do eixo (5).

Requisitos de aplicação	Valor
Qual o diâmetro externo em bruto (mm)?	63,5
Qual o diâmetro externo final (mm)?	60
Qual a área da seção transversal mínima (mm ³)	28170
Qual o momento de inércia mínimo necessário (mm ⁴)?	20047,9
Qual a tensão de escoamento do eixo σ_{eixo} (MPa)?	310
Qual o comprimento (mm)?	2745
Se for um tubo qual a espessura da parede máx. disponível (mm)?	15,6
Qual a pressão externa (MPa)?	180
É necessário eixo sem usinagem radial?	7
É necessária usinagem de <i>features</i> profundas?	7
É necessária flexibilidade de geometria/layout?	4
É necessária variedade de ligas e materiais?	3
É necessário processo de tratamento térmico?	0
É necessária relação peso/inércia elevada (dinâmica)?	0
É necessária relação peso/rigidez elevada (cargas)?	0
É necessária suportar altas pressões radiais?	10
É necessária baixa sensibilidade a concentração de tensões?	7
É necessário facilidade de balanceamento?	4
É imperativo baixo custo por peso?	10
É necessária ampla disponibilidade/logística?	8

Fonte: Própria

Nesta etapa, o SE fará um processo de eliminação das alternativas que não atendem a um determinado requisito de aplicação necessário. Além disso, irá fazer um pré-ranqueamento usando o método MCDM PROMETHEE-II. De acordo com as respostas do projetista o ranking tem a seguinte ordem: barra laminada, barra trefilada, tubo trefilado, tubo mecânico, barra retificada. Neste caso, o ranking foi fortemente influenciado pelo custo.

2 - IF os componentes deste grupo são aplicáveis

AND todos os eixos têm momento de inércia maior que o informado pelo projetista

THEN estes componentes são aplicáveis

Como o valor do momento de inércia informado pelo projetista é menor que o valor de todos estes tipos de eixos neste diâmetro que compõem o banco de dados do SE, todos podem ser usados.

3 - IF os componentes deste grupo são aplicáveis

AND se a parede dos tubos for maior que a informada pelo projetista

THEN estes componentes são aplicáveis

Como foi informado na tela de entrada do SE, a espessura máxima da parede do tubo é de 15,6mm. Para a utilização do anel tipo 1 neste eixo, 1,75mm são removidos devido à usinagem radial necessária, mas este anel exige uma parede de espessura mínima de 15,43mm (cálculo feito pelo SE). Assim, a parede ficaria com 13,85mm de espessura após a usinagem, o que é insuficiente para manter as tensões dentro do campo elástico para este tipo de anel. A combinação do anel tipo 1 com tubos, portanto, não é possível, já que não há tubos com paredes mais espessas. O mesmo acontece com o anel tipo 4, que exige uma parede mínima de 14,06mm. Para a utilização de tubos, o único tipo de anel que pode ser usado é o tipo 3, que gera baixa pressão radial e necessita de apenas 6,43mm de espessura.

Como o tubo mecânico e a barra redonda trefilada exigem usinagem radial, fica evidente, neste caso, que o mais viável seria usar uma barra laminada, que também precisa da usinagem radial, mas é mais barata.

Se, em função dos outros componentes selecionados e que serão montados no eixo, for mais viável não usar processos de usinagem, a melhor opção será o eixo trefilado com precisão h11, h9 ou o eixo retificado h7 ou h9. Caso sejam usados os anéis de fixação, por exemplo, será exigida uma tolerância h11 no eixo. Porém, os rolamentos montados sobre buchas requerem tolerância h10.

A Tabela 5-12 mostra o ranqueamento dos diversos tipos de eixos, considerando materiais e preços pré-estabelecidos no SE. Neste caso, o material para eixos seria o aço SAE 1045, além de um tubo St 52 normalizado.

Tabela 5-12: Ranqueamento do eixo (5).

Tipo de componente	Barra Laminada	Barra Trefilada h11	Barra Trefilada h9	Barra Retificada h7	Tubo Mecânico	Tubo Trefilado
Peso (kg)	68,80	61,31	61,31	61,31	51,00	39,31
Custo do eixo (R\$)	297,22	315,89	569,57	667,05	357,00	314,48
Espessura mínima de parede após usinagem (mm)	X	X	X	X	15,43	15,43
Posição no ranking por custo (R\$)	1	2	3	4	X	X

Fonte: Própria

- **Mancal (7):**

O projetista seleciona o grupo funcional mancalização no SE e responde às perguntas dos requisitos de aplicação, mostradas na Tabela 5-13, para que possam ser selecionadas e ranqueadas as melhores alternativas para esta aplicação.

Tabela 5-13: Requisitos de aplicação do mancal (7).

Requisito de aplicação	Valor
Possui carga radial?	10
Possui carga axial em uma direção?	0
Possui carga axial em ambas as direções?	3
Possui carga combinada?	10
Possui carga de choque?	0
Possui alta velocidade giro?	0
É necessário precisão de giro?	0
É necessário elevada rigidez?	0
É necessário baixo torque?	0
É necessário funcionamento silencioso?	3
É necessário compensação de desalinhamento?	10
Deve haver tolerância ao desalinhamento?	10
É necessário compensação linear no rolamento?	0
É possível compensação linear por ajuste livre?	0
Deve atuar como lado livre?	7
Deve atuar como lado fixo?	7
É necessário vedação?	10
É necessário que o rolamento seja separável?	0
É necessário furo cônico?	10
É necessário ajuste de folga?	0
Deve funcionar sem lubrificação?	0
Deve gerar pouco calor?	0
É necessário elevado amortecimento?	0
Deve manter a forma do eixo?	10
Deve ser compacto na direção axial?	0
Deve ser compacto na direção radial?	0
É imperativo o baixo custo?	7
É imperativo a disponibilidade/Logística?	9
Deve dispensar usinagem/precisão no eixo?	10
Deve dispensar usinagem fixação axial no eixo?	10
Deve dispensar rugosidade controlada no eixo?	5
Pequena variação na folga radial do eixo?	0
Deve propiciar montagem/desmontagem rápida?	10
É preciso dispensar fabricação do alojamento?	10
Deve ser tolerante à fadiga?	3

Fonte: Própria

Considerando as respostas do projetista, a primeira regra do processo de seleção é avaliar se todas as alternativas deste grupo podem ser aplicadas, atendendo aos requisitos de aplicação exigidos.

1 - IF os componentes deste grupo são aplicáveis

AND todos os requisitos de aplicação que foram respondidos com valores entre 1 e 10, e tem índice de performance diferente de zero

THEN estes componentes são aplicáveis

A Tabela 5-14 mostra a posição, no ranking feito pelo método MCDM PROMETHEE-II, das diversas alternativas de mancais que podem ser aplicadas para o eixo (5).

Tabela 5-14: Ranqueamento do mancal (7).

Tipo de componente	Mancal + Rolamento rígido de esferas UCR	Mancal + Rolamento rígido de esferas UCR + Bucha H + Arruela MB + Porca KM	Mancal + Bucha H com Rolamento autocompensador de esferas	Mancal + Bucha H com Rolamento autocompensador de rolos
Posição no ranking	1	2	3	4

Fonte: Própria

Como foi informado na tela de entrada do SE, por meio de pesos com o valor máximo (Tabela 6-13), que o mancal deveria ser autocompensador e evitar a construção de alojamento, apenas as alternativas que atendam esses requisitos podem ser empregadas. Por uma questão de custos, o SE indicou como a melhor alternativa o conjunto mancal com caixa F212 e rolamento UCR 212, que ocupa a primeira posição no ranking. Esta alternativa apresenta um custo de R\$253,32.

O conjunto mancal com caixa F213, rolamento UK 213, bucha H 2313, porca KM 13 e arruela de trava MB 13 é a segunda melhor ranqueada. Neste caso, o rolamento tem furo cônico e é montado sobre a bucha H, fixado pela porca KM e travado pela arruela MB. Para o mesmo diâmetro de eixo, suporta uma carga dinâmica 9,3% maior, pode ser montado diretamente sobre um eixo retificado ou trefilado com precisão h9, não necessitando de usinagens, mas tem um custo de R\$ 417,39 (64,77% mais caro). No entanto, a diferença absoluta no preço se amplia, já que existem 4 componentes neste conjunto. Porém, também devem ser consideradas ganhos no tempo de montagem e no tempo de manutenção. Além disso, quando usado com uma barra

redonda retificada, diminui o gerenciamento da produção, já que os componentes são comprados prontos para serem montados diretamente uns com os outros.

Até então, o SE foi usado para selecionar cada um dos componentes comerciais deste conjunto, levando em consideração o custo do componente e o custo dos processos de fabricação para a compatibilização de interfaces. Porém, para que se tenha uma análise de custo coerente e abrangente, é necessário avaliar o conjunto com todos os componentes. Esta análise pode ser feita pelo SE e é mostrada na Tabela 5-15.

Tabela 5-15: Análise do conjunto atual em relação as alternativas propostas

Item	Projeto atual		Alternativa 1		Alternativa 2	
	Componente	Custo	Componente	Custo	Componente	Custo
Transmissão (3) ₍₁₎	Correia 2200-8M-GT3-50	2562,05	Correia 2200-8M-GT3-50	2562,05	Correia 2200-8M-GT3-50	2562,05
Fixação cubo-eixo 1-2	Chaveta 14x9x50	140,98	SIT 1-48x80	123,55	Bucha TL 2012	70,31
Fixação cubo-eixo 4-5	Chaveta 18x11x60	347,66	SIT 1-60x90	140,06	SIT 1-60x90	140,06
Fixação cubo-eixo 5-6 (2)	Chaveta 18x11x80	1376,20	SIT 1-60x90	565,12	SIT 1-60x90	565,12
Eixo (5)	Barra laminada SAE 1045	297,22	Barra trefilada SAE 1045 - H9	569,57	Barra trefilada SAE 1045 - H9	569,57
Mancal (7) ₍₃₎	Caixa F212 + UCR 212	759,96	Caixa F213 + UK213 + H2313 + KM13 + MB13	1252,17	Caixa F213 + UK213 + H2313 + KM13 + MB13	1252,17
Custo estimado		5484,07		5212,52		5159,28
Posição no ranking		3		2		1

Fonte: Própria

Algumas considerações acerca da Tabela 5-15 devem ser feitas:

1. Custo do conjunto correias e polias, ou corrente e engrenagens;
2. Neste item o custo é para 4 conjuntos;
3. Neste item o custo é para 3 conjuntos completos com os itens especificados.

É possível notar que o SE, quando usado para avaliar diferentes conjuntos, auxilia o trabalho do projetista, pois este pode testar rapidamente diferentes combinações de componentes de forma a encontrar aquela que atenda a um ou mais critérios priorizados. Neste caso exemplo, foram priorizados o custo e a fabricabilidade.

Analisando-se separadamente o eixo (5) feito de barra retificada, este é 176,31% mais caro daquele feito de barra laminada. O uso de um eixo de barra retificada h9,

neste caso, se justifica apenas se forem usados componentes sobre ele que não necessitem de elevada precisão para se acoplarem. Porém, estes componentes têm custo bem mais elevado que aqueles que exigem elevada precisão do eixo (5). Analogamente, o mancal comum que exige precisão na montagem é 64,77% mais barato que aquele que não exige tanta precisão (e que usa o rolamento montado em bucha).

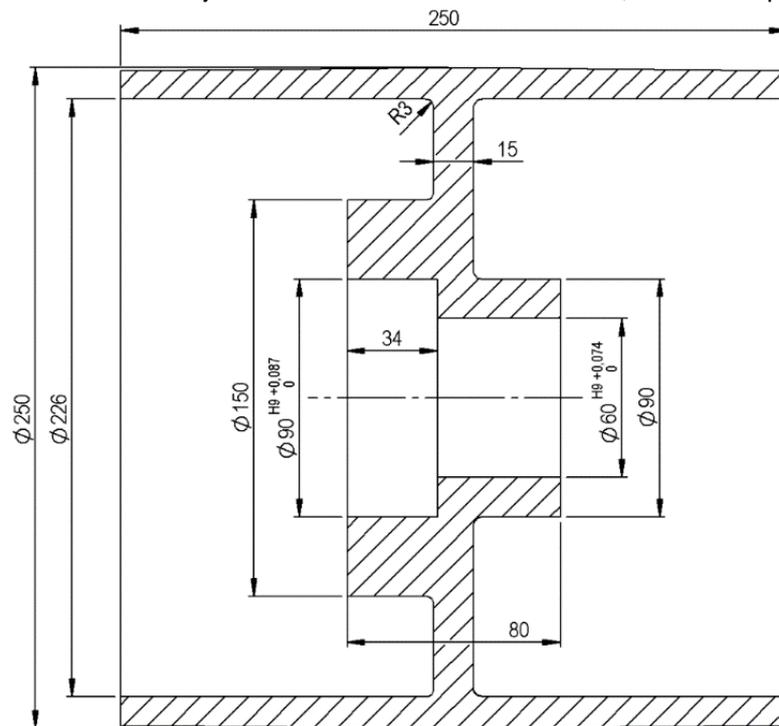
A tendência do projetista, principalmente quando está focado em custo, é sempre selecionar os componentes mais baratos. É muito trabalhoso e requer muita experiência fazer as análises que envolvem os custos de preparação das interfaces. Como pode ser observado na Tabela 5-15, o SE ranqueou as alternativas considerando, além do custo dos componentes, os custos de preparação das interfaces necessárias a todas as peças e componentes que integram este conjunto. A atividade de testar alternativas de conjuntos com vários componentes diferentes, que geram conjuntos com diferentes custos e capacidades de atender a diferentes diretrizes, aumenta exponencialmente o tempo usado pelos projetistas.

A alternativa 2 foi a melhor ranqueada, do ponto de vista de custo, pois é 6,09% mais barata que o projeto atual. Porém, o grande ganho é em fabricabilidade, pois o eixo (barra laminada) do projeto atual precisa de dois processos de fabricação (torneamento e fresamento dos canais de chaveta), enquanto a alternativa do SE evita os dois processos, ou seja, o eixo pode ser comprado pronto dos fornecedores.

O mesmo ocorre com as polias, que, no projeto atual, precisavam da usinagem de dois furos roscados para os prisioneiros (8) e (11), além do torneamento e do fresamento dos canais de chaveta. A alternativa do SE dispensa o uso de dois desses processos, o fresamento e o rosqueamento. As polias precisam apenas de um processo de torneamento com baixa precisão, como pode ser visto pelo desenho da Figura 5-12.

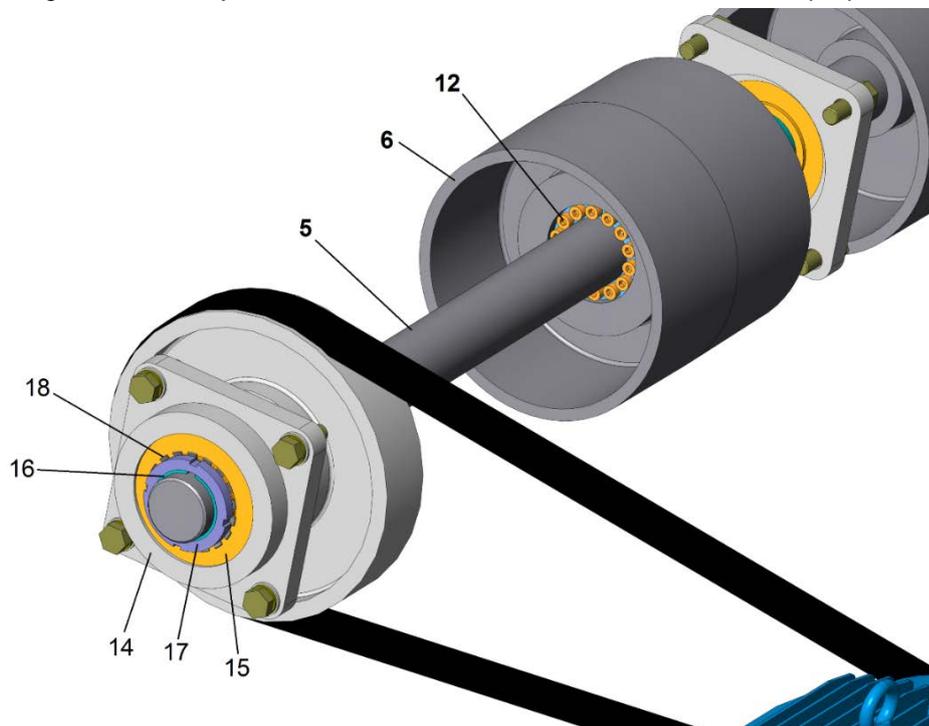
A Figura 5-14 mostra em detalhes a polia (6) fixada ao eixo (5) pelo anel SIT 1-60x90 (12). A mancalização, nesta alternativa, adota a caixa F213 (14), o rolamento UK213 (15), a bucha H2313 (16), a porca KM13 (17) e a arruela de trava MB13 (18). A Figura 5-14 mostra em detalhes a polia (2) fixada ao eixo do motor (1) pela bucha TL2012 (13) e a polia (4) fixada no eixo retificado h9 (5) pelo anel SIT 1-60x90 (12).

Figura 5-12: Polia conjunto transmissão do desbobinador, alternativa proposta



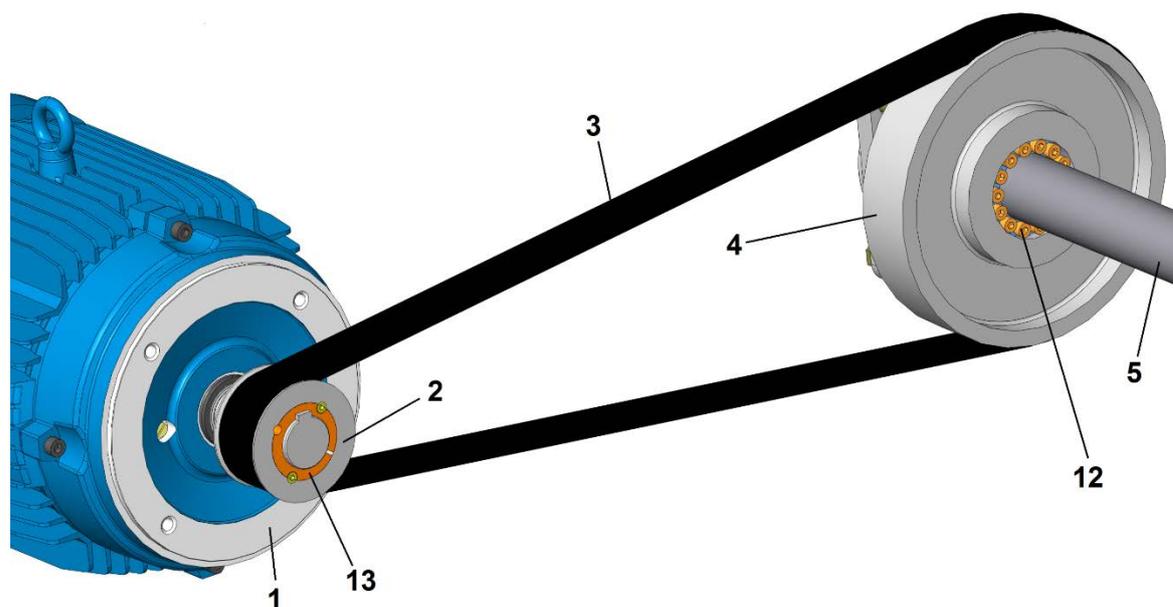
Fonte: Própria

Figura 5-13: Conjunto transmissão do desbobinador, alternativa 2 proposta.



Fonte: Própria

Figura 5-14: Conjunto transmissão do desbobinador, alternativa 2 proposta

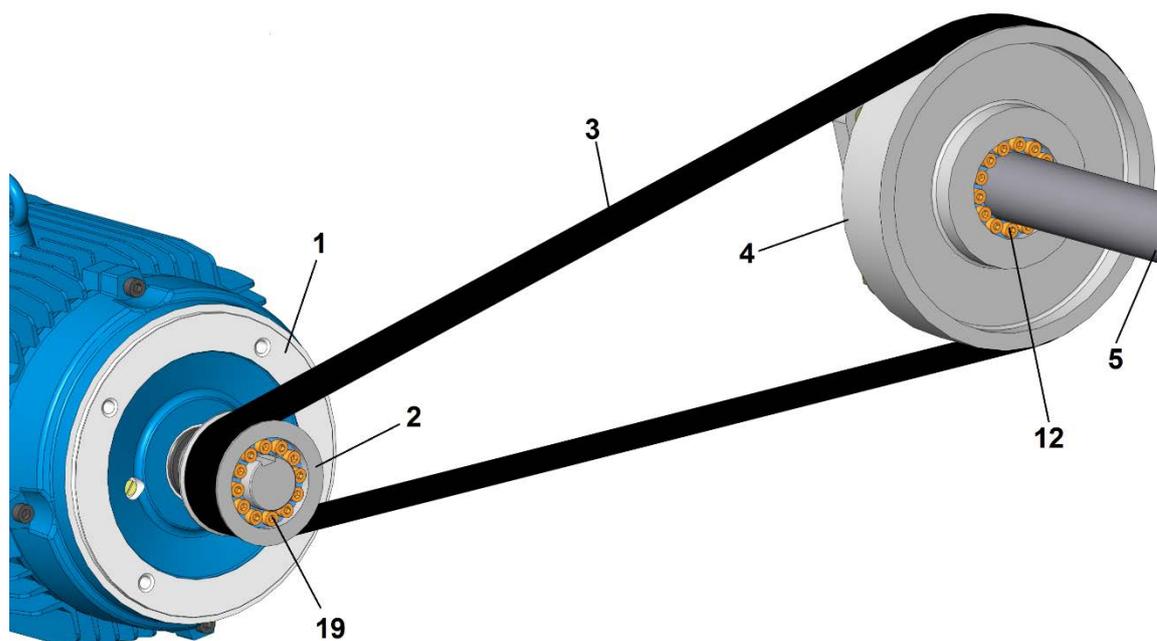


Fonte: Própria

Um aspecto a ser considerado é a redução dos tempos de montagem do conjunto, o que impacta diretamente no custo final da máquina. O ganho na redução de custo de montagens e desmontagens (para manutenção) não é estimado pelo SE, mas é uma vantagem que deve ser considerada pelas escolhas feitas dos componentes pelo SE. Isto pode ser usado também como um argumento de marketing, pois, em uma linha destas, dependendo dos equipamentos, da velocidade nominal e do formato do papel, mesmo as mais simples ultrapassam facilmente R\$ 4.000.000,00, na parte seca do processo, e R\$ 100.000.000,00, na parte úmida, isto sem considerar toda a infraestrutura da fábrica necessária para estas linhas e o custo hora dos funcionários. Assim, o custo hora de uma linha parada para manutenção gera enormes prejuízos, motivo pelo qual operam 24 hs/dia e 7 dias por semana. Por este motivo, quanto mais rápido for o processo de manutenção, maior a aceitação por parte dos clientes terá o equipamento.

O projetista também pode optar por padronizar todos os elementos de fixação cubo-eixo e, portanto, dará preferência à alternativa 1, que é 5,21% mais barata que o projeto atual e ligeiramente mais cara que a alternativa 2 (diferença de 0,84%). A alternativa 1 usa apenas o anel tipo 1 como elemento de fixação cubo-eixo e o anel SIT 1-48x80 (19) para fixar a polia (2) no eixo do motor (1), como mostrado na Figura 5-15.

Figura 5-15: Conjunto transmissão do desbobinador, alternativa 1 proposta.



Fonte: Própria

Neste caso exemplo também foram feitos testes de forma análoga ao anterior, com o mesmo número de projetistas experientes e inexperientes, comparando o processo de seleção dos componentes feito manualmente, e usando o SE. Porém neste caso, além de selecionar os componentes deste conjunto, também selecionando a melhor combinação de alternativas para este conjunto, e assim verificar a redução nos tempos do processo de seleção e a qualidade dos resultados.

Como pode ser observado na Tabela 5-16 os projetistas experientes fizeram o processo de seleção dos componentes deste conjunto em média 21,7 vezes mais rápido usando o SE do que fazendo manualmente, e os inexperientes fizeram o processo 28,5 vezes mais rápido usando o SE que manualmente. Também pode-se observar que os processos mais críticos do ponto de vista de tempo quando da seleção manual são os orçamentos, justamente o conhecimento que não é do domínio dos projetistas. Assim verifica-se que o SE elimina este gargalo de tempo por automatizar as estimativas dos custos de fabricação, logística e o custo dos componentes. Outro aspecto é que quanto maior a quantidade de componentes a serem selecionados, mais tempo é poupado. Portanto em máquinas com muitos componentes o ganho de tempo é muito grande, diminuindo o custo do projeto e, também o tempo para o lançamento do produto.

Outra característica deste SE é a possibilidade de simular rapidamente a combinação entre diferentes alternativas de componentes. Isto pode ser observado no processo de seleção do componente de fixação cubo-eixo 4-5, (FCE 4-5), onde foi feito manualmente com a barra redonda laminada. Caso fosse necessário comparar este componente sendo montado em uma barra redonda trefilada, seria necessário refazer manualmente os cálculos para verificar os custos de fabricação usando esta opção de eixo (5). No entanto, os projetistas fizeram apenas a seleção deste componente usando a barra redonda laminada. Quando foi usado o SE, os dados inseridos para a seleção do FCE 4-5 são os mesmos para a barra redonda laminada e trefilada, com a única exceção de ser necessário informar na interface de entrada o diâmetro diferente desta barra. Assim para selecionar o FCE 4-5 usando a barra redonda trefilada após ter sido feita a seleção com a barra laminada, os projetistas voltaram para a interface de entrada e alteraram apenas o valor do diâmetro do eixo. Isto é uma ação muito rápida como pode ser observado na Tabela 5-16, sendo o tempo médio de 0,5min. Com isto conclui-se que podem ser simuladas as alternativas de componentes montadas em diferentes tipos de peças de forma muito rápida.

Tabela 5-16 - Tempos gastos para o processo manual e com o uso do SE, caso 2

Componente	Tempos em min. seleção manual										
	FCE 1-2	FCE 4-5 + Lam.	FCE 4-5 + Tref.	FCE 5-6 + Ret.	Eixo 5	Mancal 7	Transm. 3	Tempo cálculo	Tempo p/ orçar	Tempo conjunto	Tempo total
Projetista E1	25,0	12,0	0,0	6,0	2,0	3,0	2,5	50,5	210,0	13,5	260,5
Projetista E2	24,5	13,3	0,0	5,0	2,5	4,5	2,0	51,8	180,0	12,5	231,8
Projetista E3	27,3	11,7	0,0	7,5	2,2	3,7	3,0	55,4	240,0	14,0	295,4
Tempo médio	25,6	12,3	0,0	6,2	2,2	3,7	2,5	52,6	210,0	13,3	262,6
Projetista I1	39,2	20,0	0,0	15,0	3,0	9,2	8,0	94,4	480,0	18,5	574,4
Projetista I2	32,1	22,2	0,0	18,5	2,5	10,3	7,0	92,6	150,0	14,0	242,6
Projetista I3	34,7	24,0	0,0	17,0	2,0	12,9	7,5	98,1	240,0	16,7	338,1
Tempo médio	35,3	22,1	0,0	16,8	2,5	10,8	7,5	95,0	290,0	16,4	385,0
Componente	Tempos em min. com o SE										
	FCE 1-2	FCE 4-5 + Lam.	FCE 4-5 + Tref.	FCE 5-6 + Ret.	Eixo 5	Mancal 7	Transm. 3	Tempo cálculo	Tempo p/ orçar	Tempo conjunto	Tempo total
Projetista E1	4,0	1,9	0,5	0,5	2,0	2,0	1,5	12,4	0,0	0,0	12,4
Projetista E2	3,2	2,0	0,4	0,4	1,7	2,2	1,6	11,5	0,0	0,0	11,5
Projetista E3	4,1	1,8	0,5	0,5	1,6	2,1	1,8	12,4	0,0	0,0	12,4
Tempo médio	3,8	1,9	0,5	0,5	1,8	2,1	1,6	12,1	0,0	0,0	12,1
Projetista I1	4,5	2,0	0,5	0,5	1,7	2,4	1,8	13,4	0,0	0,0	13,4
Projetista I2	4,7	2,1	0,6	0,6	1,9	2,3	2,0	14,2	0,0	0,0	14,2
Projetista I3	3,9	2,2	0,4	0,4	1,7	2,5	1,9	13,0	0,0	0,0	13,0
Tempo médio	4,4	2,1	0,5	0,5	1,8	2,4	1,9	13,5	0,0	0,0	13,5

Fonte: Própria

Neste caso exemplo não serão mostradas as tabelas com os tempos detalhados do processo de seleção de cada componente, porém serão comentados apenas as escolhas feitas pelos projetistas experientes e as feitas pelo SE. Os projetistas novatos, pela inexperiência, tiveram que calcular todas as alternativas para cada componente, por outro lado os projetistas experientes quando não calculavam direto a melhor alternativa averiguavam apenas outra. Na transmissão (3), em função dos requisitos de aplicação, as respostas do SE e dos projetistas foram as mesmas. Para o componente de fixação cubo-eixo 1-2 em função da pequena diferença de preço entre a bucha TL e o anel 1, os projetistas experientes precisaram calcular ambos para saber de forma assertiva qual alternativa apresenta o menor custo. Para o componente de fixação cubo-eixo 4-5 até os projetistas experientes consumiram um tempo maior pois precisaram analisar em qual tipo de eixo o componente seria montado, pois também serão montados outros componentes neste eixo. Neste caso fizeram a mesma escolha que o SE, selecionando o anel 1, levando em conta também o componente de fixação cubo-eixo 5-6, que foi a mesma alternativa apontada pelo SE. O eixo (5) também teve a mesma alternativa selecionada tanto pelo SE quanto pelos projetistas. O caso mais crítico foi na seleção do mancal (7), pois a diferença de preço entre o mancal embuchado e o que utiliza apenas o rolamento é muito grande, e tem o agravante de serem 4 peças, o que aumenta ainda mais a diferença de custo final. Neste caso os projetistas também precisaram avaliar as duas opções de mancal, pois não tinham certeza do ponto de vista de custos qual a melhor alternativa.

Com o SE também é possível ranquear o conjunto com a combinação de componentes que atendam a um determinado critério, neste caso o custo, como pode ser observado pela Tabela 5-15. A medida que o SE vai selecionando as melhores alternativas de componentes de um conjunto, estas são guardadas na memória até que todos os componentes tenham sido selecionados. Quando o projetista quer avaliar a melhor combinação de componentes do conjunto para um dado critério, este vai até a interface de saída e aciona o comando para que seja feita a combinação de componentes, que neste caso, gere o menor custo. Sem o SE esta tarefa teria que ser feita manualmente o que consome um tempo considerável dependendo da habilidade do projetista.

Outro aspecto a ser considerado é que todos os projetistas não conheciam este SE, portanto, se já tivessem tido experiência prévia os tempos seriam mais baixos no uso da ferramenta. Uma das perguntas feitas a todos os projetistas é: vc usaria este SE? A resposta foi unânime, sendo que os mais experientes colocaram que poderiam se dedicar mais a tarefa de projeto e menos a atividades que não são o seu foco, como fazer orçamentos, que consomem muito tempo, são burocráticas e por vezes enfadonhas.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho de pesquisa proporcionou a criação de um método inédito para o desenvolvimento da base de conhecimento de um SE para a seleção de componentes mecânicos que além de usar os requisitos de aplicação no processo de seleção, também considera os aspectos listados abaixo não observados em nenhum outro SE pesquisado:

Considera o custo de fabricação para a compatibilização da interface da peça no qual o componente selecionado irá se acoplar e o custo logístico do processo desta compatibilização, quando necessário.

Também leva em conta as diretrizes do projeto e os recursos de fabricação da planta. Paralelamente ao processo de seleção, o SE também pode dimensionar os componentes selecionados e suas interfaces.

Além de selecionar os componentes de um conjunto, também pode selecionar a melhor combinação de componentes que formam um conjunto de maneira que atendam a uma determinada diretriz de projeto.

O processo de aquisição do conhecimento é uma das principais etapas de desenvolvimento de um SE, e é considerado como um dos estágios mais importantes em sua execução. Assim, foi proposto um método que permite que o conhecimento seja adquirido de forma sistemática e organizada pelo engenheiro do conhecimento e pelo especialista, com o objetivo de construir a base de dados do SE.

O método de aquisição de conhecimento proposto se mostrou eficaz, já que o uso das matrizes de decisão concentra uma grande quantidade de informações de modo objetivo, evitando o uso de vários documentos diferentes. Outro aspecto observado é a praticidade e eficácia do uso das matrizes de dependência, que mostram o grau de compatibilidade e os requisitos das interfaces que um componente de um grupo funcional exige do outro para que estes possam se acoplar.

O uso de um modelador 3D para representar os componentes e de cores para identificar suas superfícies funcionais que são as interfaces, tornou o trabalho de

descrição dos requisitos de cada uma destas interfaces mais rápido e objetivo, além de evitar que alguma interface pudesse ser esquecida ou negligenciada.

O método proposto difere dos existentes pelo fato de utilizar matrizes de decisão para um pré-ranqueamento dos componentes que atendam aos requisitos de aplicação. Também faz uma análise de compatibilidade das interfaces dos componentes que se acoplarão. Esta análise tem o intuito de fazer um ranqueamento das alternativas de componentes baseada no custo do componente somado ao custo de compatibilização das interfaces e custo logístico para a terceirização dessa compatibilização (se necessário). Esta análise de compatibilidade é realizada por meio de regras, que são baseadas no conhecimento das matrizes de dependência sobre os requisitos que as interfaces do componente selecionado requerem daquele no qual irá se acoplar.

Este trabalho permitiu o desenvolvimento de um método para criar um SE modular, que pode ser usado na seleção de diferentes tipos de componentes, pertencentes a diferentes grupos funcionais, integrados no mesmo sistema. Em função disso, o SE também pode ser desenvolvido para diferentes domínios, desde que sua base de conhecimento seja adaptada.

O SE foi validado através de dois casos exemplo, ambos pertencentes a um projeto de uma máquina de processamento de papel. No primeiro, o SE foi utilizado para a seleção de apenas um componente de um conjunto, enquanto que, no segundo, vários componentes do mesmo conjunto foram selecionados simultaneamente.

Uma grande economia de tempo no processo de seleção pode ser observada com o uso do SE. Além disto, evita retrabalhos de escolha dos componentes por fazer uma seleção com qualidade e levando em conta vários aspectos não considerados principalmente pelos projetistas pouco experientes. Um dos gargalos de tempo observado com os testes foram os tempos para os orçamentos, porque é uma tarefa totalmente manual, e com frequência os projetistas necessitam de auxílio dos departamentos comercial e de fabricação para realizá-la, pois são atividades que não são do seu domínio. Desta forma o SE proposto, permite que os projetistas se dediquem mais ao processo criativo do que ao processo de seleção.

O SE permite a seleção de todos os componentes que fazem parte de um conjunto, sem ser necessário o uso de outras ferramentas. Além disso, dinamiza o fluxo de trabalho e assegura a preservação e padronização dos processos de seleção, já que o processo decisório é realizado através da sua base de conhecimento.

Este SE documenta o *know-how* usado no projeto, além de diminuir a possibilidade de erros de projeto. Assim, o projetista pode conhecer quais os componentes que podem ser usados em determinada aplicação, ranqueados pela ordem dos que melhor atendem a uma dada aplicação. Além disso, o SE também informa ao projetista quais componentes estão sendo usados no projeto, como se conectam e se influenciam, porque foram selecionados, quais critérios e ênfases usados na seleção, quais componentes não poderão ser usados e por qual motivo. Também permite a visualização das características de aplicação de cada componente, auxiliando o projetista na identificação dos processos de fabricação das peças que se integrarão aos componentes selecionados.

Também podem ser testadas e selecionadas, rapidamente, diferentes alternativas de conjuntos, com diferentes alternativas de componentes, que possam atender determinadas diretrizes de projeto que se deseja priorizar.

6.1 Recomendações para trabalhos futuros

No processo de validação, observou-se que o SE auxilia o projetista no processo de seleção dos componentes. Porém, o SE necessita, em seu banco de dados, de algoritmos de dimensionamento dos componentes e suas interfaces para todos os grupos funcionais. Em função disso, nos desenvolvimentos futuros, sugere-se que tais algoritmos estejam disponíveis para todos os grupos funcionais.

Outra sugestão, para automatizar ainda mais o processo de obtenção das informações presentes na base de dados do SE, seria sua integração aos sistemas de ERP. Desta forma, o custo dos componentes, o custo (por hora) das máquinas operatrizes, para a usinagem das *features*, e os custos logísticos poderiam ser obtidos de forma precisa, automatizada, estando sempre atualizados. Além disso, podem ser desenvolvidos estudos para diminuir o número de perguntas feitas ao projetista na interface de entrada do SE, tornando o processo de seleção ainda mais objetivo, rápido e automatizado.

Um grande passo para a automatização e integração do processo de seleção seria a integração do SE a um software de CAD 3D. Desta forma, o projetista poderia selecionar e dimensionar um componente e, no mesmo ambiente, testar a alternativa para verificar como se adapta espacialmente ao conjunto.

Na aplicação da ferramenta, observou-se que para cada domínio ou grupo de domínios nos quais o SE pode atuar, é importante que seja feito um estudo minucioso de todos os grupos funcionais a serem usados, de forma que a ferramenta possa ser o mais efetiva e completa possível. Porém, deve-se ter o cuidado para que sejam implementados os grupos funcionais que realmente sejam usados pois, caso contrário, corre-se o risco de uma implementação longa, cara e que agrega pouco ao processo de seleção.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHLUWALIA, J., GUPTA, S. K., AGRAWAL, V. P., “**Computer-aided Optimum Selection of Roller Bearings**”, Computer Aided Design, Vol. 25, No. 8, pp. 493-499, 1993.

Alexander, I. F., Stevens, R.,” **Writing Better Requirements**” Pearson Education Ltd 2002.

ALMEIDA, A. T. de, COSTA, A. P. C. S., “**Aplicações com métodos multicritério de apoio à decisão**”, Recife: Universitária da UFPE, 2003.

ANDERSSON, F., HAGQVIST, A., SUNDIN, E., BJÖRKMAN, M., “**Design for Manufacturing of Composite Structures for Commercial Aircraft - the Development of a DFM strategy at SAAB Aero structures**”, Procedia CIRP, n° 17, pp. 362–367, 2014.

ANWER, N., SCHLEICH, B., MATHIEU, L., WARTZACK, S., “**From solid modelling to skin model shapes: Shifting paradigms in computer-aided tolerancing**”, CIRP Annals - Manufacturing Technology, n° 63, pp. 137–140, 2014.

ARAÚJO, M. P. S., BANDEIRA, R. A. M., CAMPOS, V. B. G., “**Custos e fretes praticados no transporte rodoviário de cargas: uma análise comparativa entre autônomos e empresas**”, Journal of Transport Literature, Vol. 8, n° 4, pp. 187-226, 2014.

ARMSTRONG L., “**Information Integration for Concurrent Engineering, Method Report**”, Knowledge Based Systems, Inc., 2012.

ARNETTE, A. N., BREWER, B. L., CHOAL, T., “**Design for sustainability (DFS): the intersection of supply chain and environment**”, Journal of Cleaner Production, n° 83, pp 374-390, 2014.

ASHBY M. F., “**Materials and the Environment: Eco-Informed Material Choice**”, Editor Elsevier, Oxford, 2009.

ASHBY M. F., BRÉCHET Y. J. M., CEBONA D., SALVO L. “**Selection strategies for materials and processes**”, Materials and Design, n° 25, pp 51-67, 2004.

ATHAWALE, V., CHAKRABORTY, S., “**A comparative study on the ranking performance of some multi-criteria decision-making methods for industrial robot selection**”, International Journal of Industrial Engineering Computations, nº 2, pp. 831-850, 2011.

ATI, “**Artigos técnicos industriais**”, Catálogo técnico, 2015.

BALLOU, R. H., “**Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: planejamento, organização e logística empresarial**”, 4ª edição, Editora Bookman Porto Alegre, 2001.

BANA e COSTA, C. A., VASNICK, J. C., “**Thoughts a theoretical framework for measuring attractiveness by categorical based evaluation technique (MACBETH)**”, Multicriteria Analysis, Springer-Verlag, Berlin, 1997.

BARR, A. e FEIGENBAUM, E. “**The handbook of artificial intelligence**”, 1st ed. California: William Kaufmann Inc.; 1981.

BHANDARKAR, M. P., DOWNIE, B., HARDWICK, M., NAGI, R., “**Migrating from IGES to STEP: one to one translation of IGES drawing to STEP drafting data**”, Computers in Industry, vol. 41, nº 3, pp. 261–277, 2000.

BLANDING, D. L., “**Exact Constraint: Machine Design Using Kinematic Principles**”, New York: ASME Press, 1999.

BOOTHROYD G., DEWHURST P., KNIGHT W., “**Product Design for Manufacture and Assembly**”, 2ª Ed., Editor Marcel Dekker, New York, 2002.

BRANS, J., VINCKE, MARESCHAL, B., “**How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method**”, European Journal of Operational Research, nº 24, pp. 228-238. 1986.

BUCHANAN, B., BARSTOW, D., BECHTEL, R., “**Building Expert Systems**”, Ed. Addison Wesley, 1983.

CABIGIOSU, A., ZIRPOLI, F., CAMUFFO, A., “**Modularity, interfaces definition and the integration of external sources of innovation in the automotive industry**”, Research Policy, nº 42, pp. 662-675, 2013.

CHABCHOUB, H., MARTEL, J.M., “**A mathematical programming procedure for the choice problematic**”, European Journal of Operational Research, nº 153, pp 297–306, 2004.

CHEN, K. M., LIU, R. J., “**Interface strategies in modular product innovation**”, Technovation, nº 25, pp. 771-782, 2005.

CLEWS, G. AND LEONARD, R., “**Technology and Production**”, Philip Allan Publishers Limited, Oxford, 1985.

COUTURIER, P., LÔ, M., IMOUSSATEN, A., CHAPURLAT, V., MONTMAIN, J., “**Tracking the consequences of design decisions in mechatronic Systems Engineering**”, Mechatronics, nº 24, pp. 763–774, 2014.

CRUL, M.R.M., DIEHL J.C., “**Design for Sustainability a Practical Approach for Developing Economies**”, Delft University of Technology, Netherlands, 2005.

DAGDEVIREN, M., “**Decision making in equipment selection: An integrated approach with AHP and PROMETHEE**”, Journal of Intelligent Manufacturing 19, 397–406, 2008.

DANILOVIC, M., BROWNING, T. R., “**Managing complex product development, projects with design structure matrices and domain mapping matrices structure matrices and domain mapping matrices**”, International Journal of Project Management, nº 25, pp. 300–314, 2007.

DAVENPORT, T. H., PRUSAK, L., “**Working Knowledge**”, Harvard Business School Press, Boston, 1998.

DEPECON “**Panorama da indústria de transformação brasileira**”, FIESP, CIESP, 7ª edição, 2015.

DIETER, G. E., SCHMIDT, L. C., “**Engineering Design**”, 4th edition McGraw-Hill, New York. 2009.

DOMBROWSKI, U., SCHMIDT, S., SCHMIDTCHEN, K., **“Analysis and integration of Design for X approaches in Lean Design as basis for a lifecycle optimized product design”**, Procedia CIRP, nº 15, pp. 385–390, 2014.

DUFFY, A. H. B., SIM, S. K., **“Towards an ontology of generic engineering design activities”** Research in Engineering Design, V. 14, nº 4, pp. 200-223, 2003.

ENGBLOM, J., SOLAKIVI, T., TÖYLI, J., OJALA, L., **“Multiple-method analysis of logistics costs”**, Int. J. Production Economics, nº 137, pp. 29–35, 2012.

EPPINGER, S. D., BROWNING, T. R., **“Design Structure Matrix Methods and Applications”**, The MIT Press Cambridge, Massachusetts London England, 334p., 2012.

ER, A., DIAS, R., **“A rule-based expert system approach to process selection for cast components”**, Knowledge Based Systems, 13, pp. 225-234, 2000.

ERIXON, G., YXKULL, A., ARNSTRÖM, A., **“Modularity – the Basis for Product and Factory Reengineering”**, Annals of the CIRP, V. 45, nº 1, pp. 1-6, 1996.

FAG, **“Rolling Bearings”**, Schaeffler Technologies GmbH, 2015.

FEIGENBAUM, E. A. et al., **“On generality and problem solving: A case study using Dendral program”**, Machine Intelligence, nº 6, pp. 165-190, 1971.

FERGUSON, G. L., ROBISON, M., MOYNIHAN, G. P., **“Expert System for Selecting Speed Reduction Components for a Power Transmission”**, Journal of Manufacturing Systems, 18-1, pp. 66-74, 1999.

FINGUER, S., DIXON J. R., **“A Review of Research in Mechanical Engineering Design. Part I Descriptive, Prescriptive, and Computer-Based Models of Design Processes”**, Research in Engineering Design, nº 1 pp. 51-67, 1989.

FIXSON, S. K., **“Product Architecture Assessment: A Tool to link Product, Process, and Supply Chain Design Decisions”**, Journal of Operations Management, V. 23, n. 3-4, pp. 345-369, 2005.

FOLZ, C. J., CARVALHO, F. H. T., **“Ecosystema e inovação”**, Embrapa Brasília, 2014.

FULOP, J., **“Introduction to decision making methods”**, Laboratory of Operations Research and Decision Systems, Computer and Automation Institut Hungarian Academy of Sciences, 2005.

GATES DFPro, http://www.gates.com/designflex/index.cfm?Location_id=809, acesso 08/2015.

GEA, J. M C., NICOLÁS, J., ALEMÁN, J. L. F., TOVAL, A., EBERT, C., VIZCAÍNO, A., **“Requirements engineering tools: Capabilities, survey and assessment”**, Information and Software Technology, n° 54, pp. 1142–1157, 2012.

GKOfrete, <http://www.gkofrete.com.br/index.php>, acesso 10/2015.

GOLETSSIS, Y., PSARRAS, J., SAMOUILIDIS, J.E., **“Project ranking in the Armenian energy sector using a multicriteria method for groups”**. Annals of Operations Research, n° 120, pp 135–157, 2003.

GOMES, L. F. M. A.; ARAYA, M. C. G. & CARIGNANO, C., **“Tomada de decisões em cenários complexos”**, São Paulo: Pioneira, 2004.

GOMES, L. F. M. A.; GOMES, C. F. S. & ALMEIDA, A. T., **“Tomada de decisão Gerencial: Enfoque Multicritério”**, Rio de Janeiro: Atlas, 2002.

HACKENBERG, G., CHRISTOPH RICHTER, C., ZÄH M. F., **“A multi-disciplinary modeling technique for requirements management in mechatronic systems engineering”**, Procedia Technology, n° 15, pp. 5–16, 2014.

HALLIGAN, R. J. **“Systems Engineering Principles - Essence and Implementation”**, Project Performance through Systems Engineering, 2010.

HARMER, Q. J., WEAVER, P. M. AND WALLACE, K. M., **“Design led component selection”**. Computer-Aided Design, Vol. 30 n° 5, pp 391-405, 1998.

HICKS, B. J., CULLEY, S. J., **“An integrated modelling environment for the computer-based embodiment of engineering systems with standard**

components”, Journal Engineering Manufacture, Proc. Instn. Mech. Engrs, vol. 218 Part B, 2004.

HILLSTRÖM, F., “**Applying Axiomatic Design to Interface Analysis in Modular Product Development**”, Advances in Design Automation - ASME, V. 4, nº 2, 1994.

HÖLTTÄ, K. M. M., OTTO, K. N., “**Incorporating design effort complexity measures in product architectural design and assessment**”, Design studies, V. 26, nº 5, pp. 463-485, 2005.

HUBKA, V., EDER, W. E., “**Design Science**”, ed. Springer, Berlin Heidelberg, New York, 1996.

INCOSE, “**SYSTEMS ENGINEERING HANDBOOK**” version 3, 2006.

IPEK, M., SELVI, H. I., FINDIK, F., TORKUL, O., A, CEDIMOGLU, I. H., “**An expert system based material selection approach to manufacturing**”, Materials and Design, nº 47, pp. 331–340, 2013.

JAHAN, A., ISMAIL, M. Y., SAPUAN, S. M., MUSTAPHA F., “**Material screening and choosing methods – A review**”, Materials and Design, nº 31, pp 696-705, 2010.

JIAO, Q., LAN, Y., GUAN, Z., LI, Z., “**A New Material Selection Approach Using PROMETHEE Method**”, International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology, pp. 2950-2954, 2011.

KEENEY, R. L., RAIFFA, H., “**Decisions with multiple objectives, Preferences and Value Trade-offs**”, New York John Wiley & Sons, 1976.

KRAUSE, D., EILMUS S., “**Methodical support for the development of modular product families**”, Ed. Springer, 2011.

KRUMENAUER, F. Z., MATAYOSHI, C. T., SILVA, I.B., STIPKOVIC, M. F., BATALHA, G. F., “**Concurrent engineering and DFMA approaches on the development of automotive panels and doors**”, Proceedings of the 9th Global Congress on Manufacturing and Management (GCMM'2008) Holiday Inn, Surfers Paradise, Australia, 2008.

- LIU, C., LI, Y., WANG, W., SHEN, W., “**A feature-based method for NC machining time estimation**”, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, nº 29, pp. 8–14, 2013.
- LUO, D. B., FRIDRICI, V., KAPSAB, P. H., “**Systematic Approach for the Selection of Tribological Coatings**”, Wear, nº 271, pp 2132–2143, 2011.
- MAHER, M. et al., “**Tools and techniques for Knowledge Based expert system for engineering design**”, Adv. Eng. Software, nº 6, Pp. 178-188, 1984.
- MAHESWARI, J. U, VARGHESE, K., “**Project Scheduling using Dependency Structure Matrix**”, International Journal of Project Management, nº 23, pp. 223–230, 2005.
- MARINS, C. S., COZENDEY, M. I., “**A metodologia de multicritério como ferramenta para tomada de decisões gerenciais: um estudo de caso**”, In: 25º Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP). Anais. Porto Alegre / RS, 2005.
- MARTIN, “**Quick Detach and Taper Lock bushings**”, Catálogo técnico, 2015.
- MELCONIAN, S., “**Elementos de máquinas**”, Ed. Érica, 8ª edição, 2007.
- MILLER, T. D., ELGARD, P. “**Defining Modules, Modularity and Modularization**”, In: IPS research seminar, nº 13, Fuglsoe Proceedings, Fuglsoe, 1998.
- MOK, C. K., CHIN, K. S., LAN, H., “**An Internet-based intelligent design system for injection molds**”, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, nº 24, pp. 1–15, 2006.
- MOLCHO, G., CRISTAL, A., SHPITALNI, M. “**Part cost estimation at early design phase**”, CIRP Annals - Manufacturing Technology, nº 63, pp. 153–156, 2014.
- MOTZ, D. S., HAGHIGHI, K., “**A Knowledge-Based Design Model for Mechanical Components**”, Engineering Application Artificial Intelligence. Vol. 4, nº 5, pp. 351-358, 1991.

NARITA, N., “**A Study of Automatic Determination of Cutting Conditions to Minimize Machining Cost**”, Procedia CIRP, nº 7, pp. 217–221, 2013.

NEUGEBAUER, DENKENA, B., WEGENER, K., “**Mechatronic Systems for Machine Tools**”, Annals of the CIRP, V. 56, nº 2, pp. 657-686, 2007.

NORTON, R. L., “**Projeto de máquinas uma abordagem integrada**”, Ed. Bookman, 4ª edição, 2013.

NTC, “**Manual de Cálculo de Custos e Formação de Preços do Transporte Rodoviário de Cargas**”, DECOPE – Departamento de Custos Operacionais Estudos Técnicos e Econômicos, São Paulo, 2014.

OPRICOVIC, S., TZENG, G., “**Extended VIKOR method in comparison with outranking methods**”, European Journal of Operational Research, nº 178, pp. 514–529. 2007.

PAHL, G. BEITZ, W., FELDHUSEN, J., GROTE, K. H., “**Engineering Design: A Systematic Approach**”, 3rd edition, Springer Verlag London. 2007.

PARRA, E., DIMOU, C., LLORENS, J., MORENO, V., FRAGA, A., “**A methodology for the classification of quality of requirements using machine learning techniques**”, Information and Software Technology nº 67, pp. 180–195, 2015.

PENG, C., DU, H., LIAO, T. W., “**A research on the cutting database system based on machining *features* and TOPSIS**”, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Article in press, 2016.

PEREIRA, M., “**Metodologia de projeto para sistemas mecânicos de precisão reconfiguráveis**”, Tese de Doutorado, Universidade Federal De Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

PEREIRA, M., WEINGAERTNER, W. L., FORCELLINI, F. A., “**Design methodology for reconfigurable precision systems applied to a sclerometer development**”, In: CIRP - International Seminar on Manufacturing Systems, Proceedings, Florianópolis, 2005.

PERZYK, M., MEFTAH, O. K., “**Selection of manufacturing process in mechanical design**”, Journal of Materials Processing Technology, nº 76, pp. 198-202, 1998.

PIMMLER, T. U.; EPPINGER, S. D., “**Integration Analysis of Product Decompositions**”, In: ASME conference on design theory and methodology, Proceedings Minneapolis, pp. 343-351, 1994.

PODVEZKO, V., “**The Comparative Analysis of MCDA Methods SAW and COPRAS**”, Inzinerine Ekonomika-Engineering Economics, pp. 134-146, 2011.

ATHAWALE, V., CHAKRABORTY, S., “**A comparative study on the ranking performance of some multi-criteria decision-making methods for industrial robot selection**”, International Journal of Industrial Engineering Computations, nº 2, pp. 831-850, 2011.

PONTES, H. L. J., PORTO, A. J. V., “**Um modelo para simulação de sistemas de manufatura baseado na tecnologia de *features***”, Revista Gestão Industrial, ISSN 1808-0448, vol. 9, nº 1, pp. 79-107, 2013.

RAHMANI, K., THOMSON, V., “**Ontology based interface design and control methodology for collaborative product development**”, Computer-Aided Design, v. 44, nº 5, pp. 432 - 444, 2012.

RANGEL, L. A. D., GOMES, L. F. A. M., “**Determinação do valor de referência do aluguel de imóveis residenciais empregando o método TODIM**”, Pesquisa Operacional v. 27, nº 2, Rio de Janeiro, 2007.

REZENDE, S. O., “**Sistemas inteligentes: fundamentos e aplicações**”, Editora Manole Ltda., Barueri SP, 527p., 2003.

RICH, E., KNIGHT, K., “**Inteligência Artificial**”, 2ª ed. Makron Books, 1993.

ROY, B., “**Classement et choix en présence de points de vue multiples**”, La Revue d'Informatique et de Recherche Opérationnelle, nº 2, pp. 57-75, 1968.

SAATY, T. L., “**Método de análise hierárquica**”, McGraw-Hill, Makron, São Paulo, 1991.

SANFILIPPO, E. M., BORGO, S., **“What are features? An ontology-based review of the literature”**, Computer-Aided Design, Article in press, 2016.

SAP, <http://www.sap.com/brazil/solution/lob/sustainability/software/transportation-management/index.html>, acesso 10/2015.

SARRAF, A., MOHAGHAR, A., BAZARGANI, H., **“Developing TOPSIS method using statistical normalization for selecting Knowledge management strategies”**, Journal of Industrial Engineering and Management, pp. 860-875, 2013.

SCALICE, R. K., SEGALIN, L. F., FORCELLINI, F. A., **“Procedimento para seleção de interfaces para produtos modulares baseado no ciclo de projeto de produtos”** Produção, vol. 22 nº 4 São Paulo, 2011.

SCHLEICH, B., WARTZACK, S. **“How can Computer Aided Tolerancing support Closed Loop Tolerance Engineering?”**, Procedia CIRP, nº 21, pp. 312–317, 2014.

SHAHWAN, A., LÉON, J. C., FOUCAULT, G., TRLIN, M., PALOMBI, O., **“Qualitative behavioral reasoning from components’ interfaces to components’ functions for DMU adaption to FE analyses”**, Computer Aided Design, nº 45, pp. 383-394, 2013.

SHIMIZU, T., **“Decisões nas organizações”**, 2ª ed. Atlas, São Paulo, 2006.

SIGNIFICADOS, Disponível em: <<http://www.significados.com.br/diretrizes/>>. Acesso em: 26/03/2015.

SILVA, V., **“Modelo multicritério de decisão em grupo para recuperação da bacia de rio Jaboatão em Pernambuco”**, 136p., Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

SIM S. K., CHAN Y. W., **“A knowledge-based expert system for rolling-element bearing selection in mechanical engineering design”**, Artificial Intelligence in Engineering, nº 6 (3), pp. 125-136, 1991.

SIM, W. W., BROUSE, P., **“Developing Ontologies and Persona to Support and Enhance Requirements Engineering Activities – A Case Study”**, Procedia Computer Science nº 44, pp. 275–284, 2015.

SIQUEIRA, O. C., FORCELLINI, F. A., “**Sistemática para seleção do tipo de união de componentes de plástico injetados**”, Congresso brasileiro de gestão de desenvolvimento de produtos, Florianópolis, 2001.

SOUZA, F. M. C., “**Decisões racionais em situações de incerteza**”, 1ª ed., editora: Universitária da UFPE, Recife, 2002.

SWIFT, K. G., “**Process Selection: From Design to Manufacture**”, ed. Butterworth Heinemann, 2003.

TANG, D., ZHU, R., TANG, J., XU, R., HE, R., “**Product design knowledge management based on design structure matrix**”, Advanced Engineering Informatics, nº 24, pp. 159–166, 2010.

TIXIER, D., MATHE, H., COLIN, J., **Logistique au service de L’Entreprise**, Paris, 253p., 1983.

TOTVS, https://www.totvs.com/sites/default/files/documents/folheto_distribuicao_logistica.pdf acesso 10/2015.

TSUBAKI, “**The complete guide to chain**” U.S. Tsubaki, Inc., Wheeling, Illinois, 2015.

TUCHO, R., SIERRA, J.M., FERNANDEZ, J. E., VIJANDE, R., MORÍS, G., “**Expert Tutoring System for Teaching Mechanical Engineering**”, Expert Systems with Applications, nº 24, pp. 415–424, 2003.

UGARTE, G. M., GOLDEN, J. S., DOOLEY, K. J., “**Lean versus green: The impact of lean logistics on greenhouse gas emissions in consumer goods supply chains**”, Journal of Purchasing & Supply Management, nº 22, pp. 98–109, 2016.

ULLMAN, D. G., “**The Mechanical Design Process**”, 3ª ed. McGraw-Hill, New York, 2003.

ULRICH, K. T., EPPINGER, S. D. “**Product Design and Development**” 3ª ed. McGraw-Hill Irwin, New York 2004.

- VASTO-TERRIENTES, L., VALLS, A., SLOWINSKI, R., ZIELNIEWICZ, P., **“ELECTRE-III-H: An outranking-based decision aiding method for hierarchically structured criteria”**, Expert Systems with Applications, nº 42, pp. 4910–4926, 2015.
- VINADE, C. A. C., **“Sistematização do processo de projeto para confiabilidade e manutenibilidade aplicado a Sistemas Hidráulicos e implementação de um sistema especialista”**, Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 233p., 2003.
- VITAL, L. P., CAFÉ, L. M. A., **“Ontologias e taxonomias: diferenças”**, Perspectivas em Ciência da Informação, vol. 16, nº 2, pp. 115-130, 2011.
- WANG, C. S., **“Web-based modular interface geometries with constraints in assembly models”**, Computers & Industrial Engineering, nº 56, pp. 1675-1686, 2009.
- WANG, J. J., YANG, D. L., **“Using a hybrid multi-criteria decision aid method for information systems outsourcing”**, Computers & Operations Research, nº 34, pp 3691– 3700, 2007.
- WECK, O., **“ESD.36J System & Project Management”**, Lecture 4, Massachusetts Institute of Technology, 2012.
- WHITNEY, D. E., **“Designing the Design Process”**, Research in Engineering Design, 2, Springer, New York, pp. 3–13, 1990.
- WHITNEY, D. E., **“Mechanical Assemblies: Their Design, Manufacture, and Role in Product Development”**, Ed. Oxford University Press, New York, 2004.
- WÜRFEL, D., LUTZ, R., DIEHL, S., **“Grounded requirements engineering: An approach to use case driven requirements engineering”**, The Journal of Systems and Software nº 117, pp. 645–657, 2016.
- ZHENG, C, DUIGOU, J. L., BRICOGNE, M., EYNARD, B., **“Multidisciplinary interface model for design of mechatronic systems”**, Computers in Industry, nº 76, pp. 24–37, 2016.
- SHIGLEY, E. J., NISCHKE, R. G., BUDYNAS, R. G., **“Projeto de engenharia mecânica”**, 7ª edição, Ed. Bookman, São Paulo, 2008.

NORMAS:

AMERICAN GEAR MANUFACTURERS ASSOCIATION AGMA 915-1-A02, "Inspection Practices - Part 1: Cylindrical Gears - Tangential Measurements. Alexandria, 2002.

AMERICAN GEAR MANUFACTURERS ASSOCIATION. AGMA - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14179-1: Gear reducers - Thermal capacity based on ISO/TR 14179-1. Alexandria, 2004.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE ANSI - AMERICAN GEAR MANUFACTURERS ASSOCIATION AGMA 1003-H07: Tooth Proportions for Fine-Pitch Spur and Helical Gearing. Alexandria, 2014.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. ANSI B17.1-1967 - R1998: Keys and Keyseats. Washington, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 11294: Barras de aço ao carbono e ligado, redondas, quadradas e sextavadas, laminadas a quente – Especificação. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6390:1995: Correntes de transmissão, de precisão, de rolos e com passo curto e rodas dentadas correspondentes - Dimensões.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 14963:2012: Correias em "V" clássicas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15177:2013: Correias poli "V" - Requisitos

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15002: Correias em "V" estreitas –Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15003: Correias em "V" para serviços leves – Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15070: Correias duplo V (hexagonais) clássicas – Requisitos. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15177: Correias poli “V” – Requisitos. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15356: Correias V variadoras de velocidade – Requisitos. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15406: Correias V para máquinas agrícolas - Colheitadeiras – Requisitos. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 4378-1:1995: Mancais de Deslizamento - Termos Definições E Classificações - Parte 1 Projeto Materiais Para Mancais E Suas Propriedades

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6591: Tubos de aço-carbono com solda longitudinal de seção circular, quadrada, retangular e especial para fins industriais – Especificação. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8261: Tubos de aço-carbono, formado a frio, com e sem solda, de seção circular, quadrada ou retangular para usos estruturais. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8647: Barras de aço de qualidade e especial, com acabamento de superfície, para construção mecânica – Especificação. Rio de Janeiro, 1988.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 2393: Welded precision steel tubes. Berlin, 1981.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 5406: Lock Washers. Berlin, 1993.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 5415: Rolling bearings - Adapter sleeves. Berlin, 2009.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 6885: Drive Type Fastenings without Taper Action; Parallel Keys, Keyways, Deep Pattern. Berlin, 1968.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 780-1: Series of Modules for Gears, Modules for Spur Gears. Berlin, 1977.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 862: Geometrical product specifications (GPS) - Calipers - Maximum permissible errors. Berlin, 2015

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 867: Basic rack tooth profiles for involute teeth of cylindrical gears for general engineering and heavy engineering. Berlin, 1986.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 868: General Definitions and Specification Factors for Gears, Gear Pairs and Gear Trains. Berlin, 1976.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 1002: Rolling bearings - Airframe bearings - Characteristics, boundary dimensions, tolerances, static load ratings. Genebra, 1983.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 1002: Rolling bearings - Airframe bearings - Characteristics, boundary dimensions, tolerances, static load ratings. Genebra, 1983.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 10317: Rolling bearings - Tapered roller bearings - Designation system. Genebra, 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 12043: Rolling bearings -- Single-row cylindrical roller bearings - Chamfer dimensions for loose rib and non-rib sides. Genebra, 2007.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 12044: Rolling bearings - Single-row angular contact ball bearings. Genebra, 2014.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 1275: Double-pitch precision roller chains, attachments and associated chain sprockets for transmission and conveyors. Genebra, 2006.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 13050: Synchronous belt drives – Metric pitch, curvilinear profile systems G, H, R and S, belts and pulleys. Genebra, 2014.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 13203: Chains, sprockets and accessories - List of equivalent terms. Genebra, 2005.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14190: Airframe rolling bearings: ball and spherical roller bearings -- Technical specification. Genebra, 1998.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14191: Airframe spherical roller bearings, single row, self-aligning, diameter series 3 and 4 -- Metric series. Genebra, 1998.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14192: Airframe spherical roller bearings, single row, self-aligning, shielded, intermediate duty - Metric series. Genebra, 1998.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14193: Airframe spherical roller bearings, single row, self-aligning, sealed, extended inner ring intermediate duty - Inch series. Genebra, 1998.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14194: Airframe spherical roller bearings, double row, self-aligning, sealed, extended inner ring, heavy duty - Inch series. Genebra, 1998.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14195: Airframe spherical roller bearings, double row, self-aligning, sealed, torque tube design, light duty - Inch series. Genebra, 1998.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14196: Airframe spherical roller bearings, double row, self-aligning, sealed, plain inner ring, heavy duty - Inch series. Genebra, 1998.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14197: Airframe spherical roller bearings, single row, self-aligning, sealed, intermediate duty - Inch series. Genebra, 1998.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14201: Airframe ball bearings, double-row, self-aligning, diameter series 2. Genebra, 1998.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14216: Airframe ball bearings, double-row, self-aligning, sealed, heavy duty. Genebra, 1998.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14217: Airframe ball bearings, double-row, self-aligning, precision, sealed, heavy duty. Genebra, 1998.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14218: Airframe ball bearings, single-row, self-aligning, sealed, heavy duty - Inch series. Genebra, 1998.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14219: Airframe ball bearings, single-row, self-aligning, precision, sealed, heavy duty - Inch series. Genebra, 1998.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14220: Airframe ball bearings, single-row, self-aligning, sealed, light duty. Genebra, 1998.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14221: Airframe ball bearings, single-row, self-aligning, precision, sealed, light duty - Inch series. Genebra, 1998.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 15242-3: Rolling bearings -- Measuring methods for vibration -- Part 3: Radial spherical and tapered roller bearings with cylindrical bore and outside surface. Genebra, 2006.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 15654: Fatigue test method for transmission precision roller chains and leaf chains. Genebra, 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 16281: Rolling bearings - Methods for calculating the modified reference rating life for universally loaded bearings. Genebra, 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 19259: Plain bearings - Bearings with embedded solid lubricants. Genebra, 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 1977: Conveyor chains, attachments and sprockets. Genebra, 2006.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 246: Rolling bearings - Cylindrical roller bearings, separate thrust collars - Boundary dimensions. Genebra, 2007.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 2795: Plain bearings - Sintered bushes - Dimensions and tolerances. Genebra, 2014.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 2982-1: Rolling bearings -- Accessories -- Part 1: Dimensions for adapter sleeve assemblies and withdrawal sleeves. Genebra, 2013.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 2982-2: Rolling bearings - Accessories - Part 2: Dimensions for locknuts and locking devices. Genebra, 2013.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 3228: Rolling bearings -- Cast and pressed housings for insert bearings -- Boundary dimensions and tolerances. Genebra, 2013.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 3290-1: Rolling bearings. Genebra, 2014.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 355: Rolling bearings -- Tapered roller bearings -- Boundary dimensions and series designations. Genebra, 2007.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 4183: Belt drives - Classical and narrow V-belts - Grooved pulleys (system based on datum width). Genebra, 1995.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 5288: Synchronous belt drives – Vocabulary. Genebra, 2001.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 5294: Synchronous belt drives – Pulleys. Genebra, 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 5295: Synchronous belts - Calculation of power rating and drive center distance. Genebra, 1987.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 5753-1: Rolling bearings -- Internal clearance -- Part 1: Radial internal clearance for radial bearings. Genebra, 2009.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 5753-1: Rolling bearings - Internal clearance - Part 1: Radial internal clearance for radial bearings. Genebra, 2009.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 5753-2: Rolling bearings - Internal clearance - Part 2: Axial internal clearance for four-point-contact ball bearings. Genebra, 2010.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 606: Short-pitch transmission precision roller and bush chains, attachments and associated chain sprockets. Genebra, 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 6336-6: Calculation of load capacity of spur and helical gears -- Part 6: Calculation of service life under variable load. Genebra, 2006.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 6691: Thermoplastic polymers for plain bearings -- Classification and designation. Genebra, 2000.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 9982: Belt drives - Pulleys and V-ribbed belts for industrial applications - PH, PJ, PK, PL and PM profiles: dimensions. Genebra, 1998.

MECHANICAL POWER TRANSMISSION ASSOCIATION. MPTA-B6i: Quick Detachable Bushing & Mating Hub Standard. Naples, 2004.

MECHANICAL POWER TRANSMISSION ASSOCIATION. MPTA-B9i: Taper-Lock Bushing & Mating Hub Standard. Naples, 2013.

ANEXO A: MÉTODO PROMETHEE II

O método é representado por meio de uma matriz de decisão, equação A.1, onde x_{ij} é o índice de desempenho da i^{th} alternativa para o j^{th} critério, e quanto maior o valor do índice de desempenho melhor é a capacidade da i^{th} alternativa de atender o j^{th} critério de seleção.

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & \cdots & X_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{m1} & \cdots & X_{mn} \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

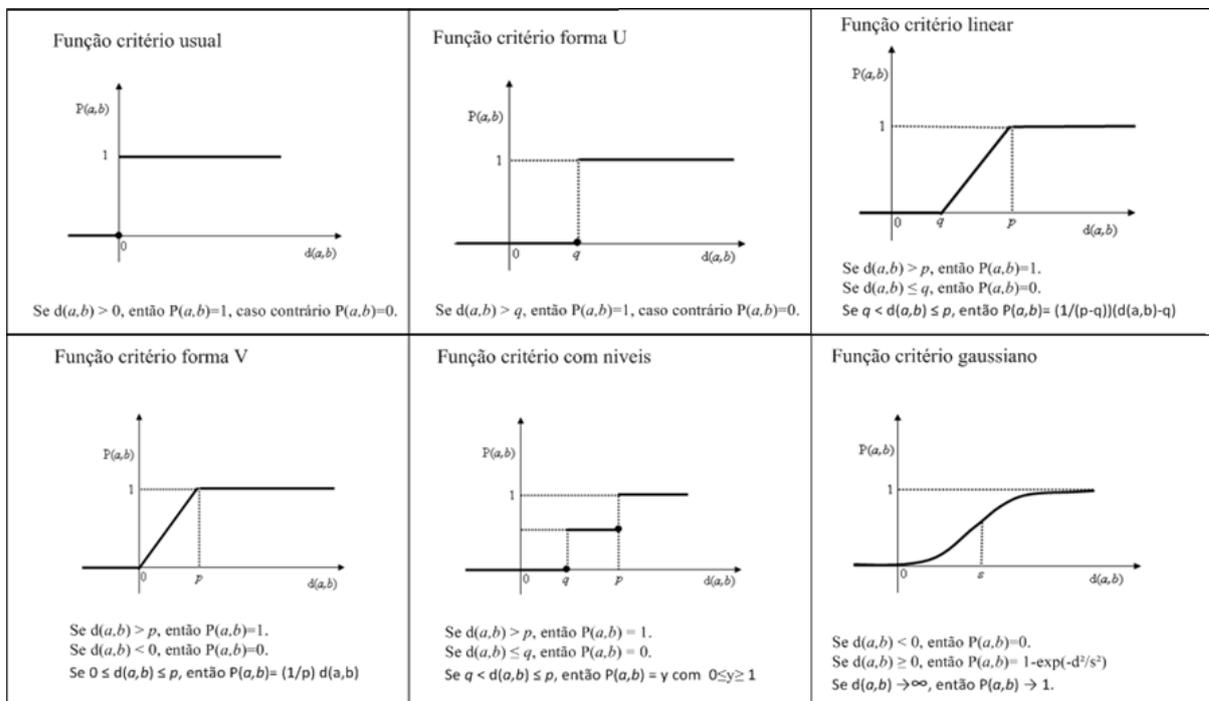
A estrutura de preferência do método PROMETHEE é baseado em comparações de pares. Neste caso, o desvio entre as duas avaliações das alternativas de um critério específico é considerado. Para cada critério, a função preferência específica $P_j(a,b)$ deve ser definida. Esta função é usada para calcular a intensidade de preferência associada com o desvio ou diferença $d_j(\)$ entre as avaliações no critério $f_j(\)$ para um par de alternativas. Quanto maior for o desvio, maior é a preferência, equação A.2.

$$P_j(a, b) = P_j[d_j(a, b)] \quad (\text{A.2})$$

Onde se considera, $d_j(a, b) = f_j(a) - f_j(b)$, para critérios que sejam maximizados, e $d_j(a, b) = f_j(b) - f_j(a)$ para critérios a serem minimizados.

O método PROMETHEE permite a escolha entre seis critérios generalizados para definir a função preferência e identificar a intensidade da preferência. Conforme a maneira com que preferência do decisor aumenta com a diferença entre o desempenho das alternativas para cada critério $[g_j(a) - g_j(b)]$, ele pode definir uma função $P(a,b)$ que assume valores entre 0 e 1. Os critérios generalizados são mostrados na Figura A.1. Da Figura A.1 pode-se observar que devem ser utilizados dois parâmetros q e p . Onde q representa um limite de indiferença, o maior valor para $[g_j(a) - g_j(b)]$, abaixo do qual há uma indiferença, e p representa o limite de preferência, o menor valor para $[g_j(a) - g_j(b)]$, acima do qual há uma preferência estrita (CALVANCATE e COSTAS, 2006).

Figura A.1: Formas para a função preferência.



Fonte: Silva (2008)

Para Athavale e Chakraborty (2011) em muitas aplicações pode ser difícil para o decisor escolher a função de preferência para uma dada situação específica para cada critério. Então são sugeridas as seguintes funções simplificadas de preferência dadas pelas equações A.3 e A.4. A partir da matriz de decisão é possível calcular as matrizes de preferência para cada um dos atributos a partir das funções de preferência, $P(i, i')$.

$$P_j(i, i') = 0 \quad \text{if } R_{ij} \leq R_{i'j} \tag{A.3}$$

$$P_j(i, i') = (R_{ij} - R_{i'j}) \quad \text{if } R_{ij} \geq R_{i'j} \tag{A.4}$$

Onde:

- i = componente da coluna;
- i' = componente da linha;
- j = é o critério a ser comparado;
- R_{ij} = é o índice de desempenho da i^{th} alternativa para o j^{th} critério;
- P_j = o valor da função do j^{th} critério.

Determinar a matriz de preferência geral, a partir da equação A.5 considerando os pesos: w_j de cada atributo:

$$\pi(i, i') = [\sum_{j=1}^n w_j P_i(i, i')] / \sum_{j=1}^n w_j \quad (\text{A.5})$$

Onde:

π = é o valor da preferência;

w_j = peso do critério j .

Determinar o índice de preferência positivo $\varphi^+(i)$ para a i^{th} alternativa pela equação A.6, e o índice de preferência negativo $\varphi^-(i)$ para a i^{th} alternativa pela equação A.7.

$$\varphi^+(i) = \frac{1}{m-1} \sum_{i'=1}^m \pi(i, i') \quad (i \neq i') \quad (\text{A.6})$$

$$\varphi^-(i) = \frac{1}{m-1} \sum_{i'=1}^m \pi(i', i) \quad (i \neq i') \quad (\text{A.7})$$

Finalmente é calculado o índice de preferência $\varphi(i)$ para cada alternativa usando a equação A.8. Estes índices são mostrados em ordem de acordo com as alternativas de componentes que melhor satisfazem os critérios estabelecidos.

$$\varphi(i) = \varphi^+(i) - \varphi^-(i) \quad (\text{A.8})$$

A.1. Referências Bibliográficas

CAVALCANTE, C.; COSTAS, A. **Multicriteria model of preventive maintenance**. Brazilian journal of operations & production management – 3. pp 71-86. 2006.

SILVA, V. **Modelo multicritério de decisão em grupo para recuperação da bacia de rio Jaboatão em Pernambuco**. 136p. Dissertação (Mestrado) – a Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

ANEXO B: CUSTOS LOGÍSTICOS

De acordo com o NTC (2014) a classificação de custos por tipo de cargas podem ser:

- Cargas Fracionadas Itinerante: Despachos de cargas fracionadas entre 1 e 4.000 kg sujeitos a prazos de entrega e distribuição capilar por todo o país.
- Cargas Fracionadas Urgente: Despachos de cargas fracionadas entre 1 e 4.000 kg sujeitos a prazos de entrega;
- Cargas Fracionadas Comum: Despachos de cargas fracionadas entre 1 e 4.000 kg, não sujeitos a prazos de entrega;
- Carga Lotação Industrial: Despachos constituídos por cargas predominantemente industriais, não sujeitas a prazos de entrega. Neste caso independente do volume ou peso um veículo específico é usado para o transporte, não sendo compartimentado com outras cargas.

Outros tipos de cargas como containers, graneis entre outras não serão abordadas pois não são comumente usadas nos processos logísticos em questão.

Segundo o NTC (2014) a tarifa do transporte é composta de cinco componentes tarifários básicos, que buscam ressarcir, de forma equilibrada, o transportador dos custos realizados com a prestação do serviço:

- **Taxa de Despacho** (coleta e entrega para cargas fracionadas): destina se a ressarcir o transportador, dos custos operacionais e administrativos envolvidos na operação de despacho e nas atividades de coleta e entrega.
- **Frete-peso**: tem por finalidade remunerar o transporte do bem entre os pontos de origem e de destino. Inclui tanto os custos diretos quanto custos indiretos: custos operacionais do veículo, despesas administrativas e de terminais, custos de capital e taxa de lucro operacional. A soma destes constitui o total do custo, que é específico para cada transportadora e para cada tipo de serviço realizado.
- **Frete-valor**: também chamado de *ad-valorem*, é proporcional ao valor da mercadoria transportada, tem como finalidade resguardar o transportador dos riscos de acidentes e avarias envolvidos em sua atividade.

- **GRIS:** Gerenciamento de Riscos é representado por um percentual (%) sobre o valor da nota fiscal, e independe da distância a ser percorrida. Tem a finalidade de cobrir os custos específicos decorrentes das medidas de combate ao roubo de cargas, segurança patrimonial de instalações, rastreamento de veículos, entre outros. Além disto contempla a redução de risco e transferência de riscos, além dos custos de mão de obra aplicada a estas atividades.
- **Outras taxas – Generalidades:** remuneram os serviços adicionais necessários à prestação dos serviços, e são cobradas apenas quando os serviços são efetivamente prestados. Sua cobrança pode variar com o peso transportado, valor da nota fiscal do produto ou o frete cobrado. Por exemplo, no Norte, Nordeste e Zona Franca, devem ser cobrados tributos estaduais e federais específicos.

O valor da taxa de despacho, utilizado no transporte de cargas fracionadas, é função dos seguintes custos envolvidos nas etapas de coleta e entrega:

1. Custo de deslocamento dos veículos
2. Custo do tempo parado na coleta e entrega do veículo
3. Custos administrativos envolvidos na operação de despacho e nas atividades de coleta e entrega
4. Lucro operacional

A taxa de despacho (TD) em (R\$/despacho) é calculada por despacho (coleta e entrega), portanto, a somatória dos custos envolvidos mais o lucro da operação devem ser rateados pela média de despachos do período considerado, e pode ser calculada pela equação B.1.

$$TD = 2 \times [(A + BX + DA) \times (1 + L)] / CE \quad (B.1)$$

Onde:

X = Distância média mensal percorrida pelos veículos de coleta e entrega, em km;

A = Custo fixo total da frota utilizada nas operações de coleta e entrega;

B = Custo variável por quilômetro dos veículos de coleta e entrega (R\$/km);

DA = Despesas administrativas médias mensais (R\$/mês);

L = Lucro operacional (%);

CE = média mensal de coletas e entregas realizadas pela empresa.

O custo fixo de operação do veículo é composto das seguintes parcelas:

- Remuneração mensal do capital empatado (RC)
- Salário do motorista (SM)
- Salário de oficina (SO)
- Reposição do veículo (RV)
- Reposição do equipamento/implemento (RE)
- Licenciamento (LC)
- Seguro do veículo (SV)
- Seguro do equipamento/implemento (SE)
- Seguro de responsabilidade civil facultativo (RCF)

O custo fixo mensal (CF) em R\$/mês é obtido pela equação B.2.

$$CF = RC + SM + SO + RV + RE + TI + SV + SE + RCF \quad (B.2)$$

O custo variável é composto das seguintes parcelas:

- Peças, acessórios e material de manutenção (PM)
- Despesas com combustível (DC)
- Lubrificantes (LB)
- Lavagem e graxas (LG)
- Pneus e recauchutagens (PR)

O custo variável total CV em (R\$/km) é obtido pela equação B.3.

$$CV = PM + DC + LB + LG + PR \quad (B.3)$$

O frete-valor, que, como já se disse, não se limita ao custo do seguro, tem os seguintes componentes:

- Prêmios de RCTRC (PR)
- Administração de seguros (AS)
- Indenização por extravios, perdas, danos e riscos não cobertos pelo seguro (IE)
- Segurança interna (SI)
- Seguros de instalações (ST)

- Outros seguros (OS)

A alíquota de frete-valor (FV) em (R\$) é calculada pela equação B.4.

$$FV = [(PR + AS + IE + SI + ST + OS) / VM] \times (100 / 0,8) \quad (B.4)$$

Onde:

VM = Valor da mercadoria em R\$/t

0,8 = Taxa de administração

Para maior precisão, deve-se calcular esta alíquota por faixa de distância. A Tabela B.1 publicada pela NTC e adotada para a tabela de custos de referência da NTC recomendam as seguintes alíquotas para o frete-valor:

Tabela B.1: Alíquotas frete valor.

Alíquotas de frete-valor	
Distância (km)	Alíquota (%)
0000 - 0250	0,3
0251 - 0500	0,4
0501 - 1.000	0,6
1.001 - 1500	0,7
1.501 - 2.000	0,8
2.000 - 2.600	0,9
2.601 - 3.000	1,0
3.001 - 3.400	1,1
3.401 - 6.000	1,2
Coleta e entrega	0,15

Fonte: NTC (2014)

Os custos de gerenciamento de riscos (GRIS), relacionados com o roubo de cargas, por sua vez, podem ser assim classificados:

- Seguros facultativos de desvios de cargas (SF)
- Salários (S)
- Investimentos (I)
- Custos operacionais de gerenciamento de riscos (CO)

A alíquota de gerenciamento de riscos é calculada pela equação B.5.

$$GRIS = [(SF + S + I + CO) / VM] \times (100 / 0,8) \quad (B.5)$$

Na composição final do frete de uma mercadoria podem figurar também algumas taxas e tributos, conhecidos também como Generalidades, desde que não incluídas nas despesas administrativas e de terminais, porém dependendo da situação nem sempre estão presentes, as principais são:

- Taxa de permanência de carga (armazenagem)
- Taxa de devolução de mercadorias
- Reentrega, segunda e terceira entregas
- Estadia do veículo
- Taxa de Administração das Secretarias da Fazenda (TAS)
- Taxa de Dificuldade de Entrega (TDE)
- Taxa de Restrição ao Trânsito – TRT
- Taxa de Fiel Depositário
- Taxa de Redespacho Fluvial – TRF
- Seguro Fluvial (origem/destino em Manaus - AM)
- Taxa de Administração da SUFRAMA
- Serviço de Estiva (carga e/ou descarga)
- Taxa de Entrega em Áreas Rurais – TEAR
- Mão de Obra para Carga/Descarga
- Allowance para Avarias
- Taxa de Realocação de entregas

Há outras taxas e despesas, porém, que não se aplicam na logística envolvida que este trabalho abordará. O custo logístico (CL) em (R\$/ton/km) ou quando for o caso de menores pesos (R\$/kg/km) será a soma de todas as cinco parcelas de custos que é dada pela equação B.6.

$$CL = TD + CF + CV + FV + GRIS \quad (B.6)$$

De forma a tornar mais prático e rápido o cálculo da parcela de custo logístico será feito uso da tabela B.2 inserida no SE, e que é atualizada mensalmente por um índice de correção de forma a manter os custos sempre atualizados. A tabela contempla os cinco componentes tarifários básicos que compõem o custo logístico já citados. Todos os valores citados nesta tabela são médias dos valores praticados no mercado, portanto já estão com impostos e margem de lucro. Os valores da tabela, com exceção do pedágio, são corrigidos mensalmente pelo INCTF.

Tabela B.1: Alíquotas frete valor.

Mês de referência:												Julho 14	
PERCURSO		Custo-Peso	"de 1 a 10 kg"	"de 11 a 20 kg"	"de 21 a 30 kg"	"de 31 a 50 kg"	"de 51 a 70 kg"	"de 71 a 100 kg"	"de 101 a 150 kg"	"de 151 a 200 kg"	"acima de 200 kg"	"Custo Valor (%)	
De (km)	Até (km)	R\$/t	10	20	30	50	70	100	150	200	R\$ por kg	(%)	
1	50	437,45	15,31	20,12	22,97	30,62	38,28	48,99	68,90	87,49	0,4375	0,30	
51	100	451,46	15,80	20,77	23,70	31,60	39,50	50,56	71,11	90,29	0,4515	0,30	
101	150	465,48	16,29	21,41	24,44	32,58	40,73	52,13	73,31	93,10	0,4655	0,30	
151	200	479,49	16,78	22,06	25,17	33,56	41,96	53,70	75,52	95,90	0,4795	0,30	
201	250	493,50	17,27	22,70	25,91	34,54	43,18	55,27	77,73	98,70	0,4935	0,30	
251	300	507,51	17,76	23,35	26,64	35,53	44,41	56,84	79,93	101,50	0,5075	0,40	
301	350	521,52	18,25	23,99	27,38	36,51	45,63	58,41	82,14	104,30	0,5215	0,40	
351	400	535,53	18,74	24,63	28,12	37,49	46,86	59,98	84,35	107,11	0,5355	0,40	
401	450	549,55	19,23	25,28	28,85	38,47	48,09	61,55	86,55	109,91	0,5495	0,40	
451	500	563,56	19,72	25,92	29,59	39,45	49,31	63,12	88,76	112,71	0,5636	0,40	
501	550	665,91	23,31	30,63	34,96	46,61	58,27	74,58	104,88	133,18	0,6659	0,60	
551	600	679,92	23,80	31,28	35,70	47,59	59,49	76,15	107,09	135,98	0,6799	0,60	
601	650	693,93	24,29	31,92	36,43	48,58	60,72	77,72	109,29	138,79	0,6939	0,60	
651	700	707,94	24,78	32,57	37,17	49,56	61,95	79,29	111,50	141,59	0,7079	0,60	
701	750	721,96	25,27	33,21	37,90	50,54	63,17	80,86	113,71	144,39	0,7220	0,60	
751	800	735,97	25,76	33,85	38,64	51,52	64,40	82,43	115,91	147,19	0,7360	0,60	
801	850	749,98	26,25	34,50	39,37	52,50	65,62	84,00	118,12	150,00	0,7500	0,60	
851	900	763,99	26,74	35,14	40,11	53,48	66,85	85,57	120,33	152,80	0,7640	0,60	
901	950	778,00	27,23	35,79	40,85	54,46	68,08	87,14	122,54	155,60	0,7780	0,60	
951	1.000	792,01	27,72	36,43	41,58	55,44	69,30	88,71	124,74	158,40	0,7920	0,60	
1.001	1.100	908,38	31,79	41,79	47,69	63,59	79,48	101,74	143,07	181,68	0,9084	0,70	
1.101	1.200	936,40	32,77	43,07	49,16	65,55	81,94	104,88	147,48	187,28	0,9364	0,70	
1.201	1.300	964,42	33,75	44,36	50,63	67,51	84,39	108,02	151,90	192,88	0,9644	0,70	
1.301	1.400	992,45	34,74	45,65	52,10	69,47	86,84	111,15	156,31	198,49	0,9924	0,70	
1.401	1.500	1.020,47	35,72	46,94	53,57	71,43	89,29	114,29	160,72	204,09	1,0205	0,70	
1.501	1.600	1.136,83	39,79	52,29	59,68	79,58	99,47	127,33	179,05	227,37	1,1368	0,80	
1.601	1.700	1.164,86	40,77	53,58	61,15	81,54	101,92	130,46	183,46	232,97	1,1649	0,80	
1.701	1.800	1.192,88	41,75	54,87	62,63	83,50	104,38	133,60	187,88	238,58	1,1929	0,80	
1.801	1.900	1.220,90	42,73	56,16	64,10	85,46	106,83	136,74	192,29	244,18	1,2209	0,80	
1.901	2.000	1.248,93	43,71	57,45	65,57	87,42	109,28	139,88	196,71	249,79	1,2489	0,80	
2.001	2.200	1.393,31	48,77	64,09	73,15	97,53	121,91	156,05	219,45	278,66	1,3933	0,90	
2.201	2.400	1.449,36	50,73	66,67	76,09	101,46	126,82	162,33	228,27	289,87	1,4494	0,90	
2.401	2.600	1.505,41	52,69	69,25	79,03	105,38	131,72	168,61	237,10	301,08	1,5054	0,90	
2.601	2.800	1.649,79	57,74	75,89	86,61	115,49	144,36	184,78	259,84	329,96	1,6498	1,00	
2.801	3.000	1.705,84	59,70	78,47	89,56	119,41	149,26	191,05	268,67	341,17	1,7058	1,00	
3.001	3.200	1.850,23	64,76	85,11	97,14	129,52	161,89	207,23	291,41	370,05	1,8502	1,10	
3.201	3.400	1.906,27	66,72	87,69	100,08	133,44	166,80	213,50	300,24	381,25	1,9063	1,10	
3.401	3.600	1.962,32	68,68	90,27	103,02	137,36	171,70	219,78	309,07	392,46	1,9623	1,20	
3.601	3.800	2.018,37	70,64	92,84	105,96	141,29	176,61	226,06	317,89	403,67	2,0184	1,20	

Fonte: NTC (2014)

B.2. Referências Bibliográficas

NTC, **Manual de Cálculo de Custos e Formação de Preços do Transporte Rodoviário de Cargas**, DECOPE – Departamento de Custos Operacionais Estudos Técnicos e Econômicos, São Paulo, 2014.

ANEXO C: CUSTO DE USINAGEM BASEADO EM FEATURES.

O tempo e o custo de fabricação das *features* variam conforme o tipo da *feature* que está sendo executada. As equações a seguir calculam o tempo e o custo de usinagem de uma única *feature*, baseado em seu volume de desbaste e na sua área de acabamento (PONTES e PORTO 2013). Assim se for necessário mais de uma *feature* para tornar uma interface compatível é necessário somar o custo de quantas *features* forem necessárias para isto. O tempo de fabricação é calculado pela equação C.1.

$$T_f = T_c + T_a + T_i + T_{fr} \quad (C.1)$$

Onde:

T_f – tempo de fabricação por *feature* (min)

T_c – tempo de corte (desbaste) da *feature* (min)

T_a – tempo de acabamento da *feature* (min)

T_i – tempo de improdutivo (min)

T_{fr} – tempo de troca da ferramenta (min)

O cálculo do tempo de corte (desbaste) é calculado pela equação C.2.

$$T_c = V_r / MRR \quad (C.2)$$

Porém cada *feature* tem uma taxa de remoção do material MRR em (mm³/min), a seguir serão vistas as equações das principais *features*.

Feature tipo rotacional MRR_r (passo, chanfro e arredondamento) equação C.3.

$$MRR_r = d * f * s \quad (C.3)$$

Feature tipo prismática MRR_p (plano, degrau e ranhura) equação C.4.

$$MRR_p = D * d * s \quad (C.4)$$

Feature Tipo Cavidade MRR_{ca} (Entalhe, Depressão e Rasgo) equação C.5.

$$MRR_{ca} = l * d * s \quad (C.5)$$

Feature Tipo Circular MRR_{ci} (Furo) equação C.6.

$$MRR_{ci} = d * D * v \quad (C.6)$$

Onde:

T_c – Tempo de corte (desbaste) da *feature* (min)

V_r – Volume da *feature* (mm³)

d – Profundidade do corte (mm)

D – Diâmetro do corte (mm)

l – Comprimento do corte (mm)

f – Avanço por revolução (mm)

s – Velocidade de corte (mm/min)

v – Velocidade de avanço (mm/min)

O volume das principais *features* em (mm³) é calculada da seguinte forma:

- *Features* de plano, degrau, ranhura, entalhe, depressão e rasgo = $A * C * L$
- *Features* de furo = $\pi * (D^2 / 4) * A$
- *Features* de passo = $\pi * L * (D_g^2 - D_p^2) / 4$
- *Features* de chanfro = $\pi * ((D_g^2 * D_p^2) / 4 - D_p^2 / 12) * L$
- *Features* de arredondamento = $\pi * R_g^2 * (R_g - R_p) - \pi * [(R_g - R_p) * R_p^2 * (R_g - R_p)^2 * R_p * \pi / 2 + (R_g - R_p)^3 * 2/3]$

Onde:

A – Altura;

C – Comprimento;

L – Largura;

D – Diâmetro;

D_g – Diâmetro maior;

D_p – Diâmetro menor;

R_g – Raio maior;

R_p – Raio menor.

O tempo de acabamento da *feature* T_a em (min) é calculado pela equação C.7.

$$T_a = A_f / R_t \quad (C.7)$$

Onde:

A_f – área da *Feature* (mm²)

R_t – taxa de remoção da área da *Feature* (mm²/min)

A área das principais *features* em (mm²) é calculada da seguinte forma:

- *Features* de degrau e ranhura = $A * C + C * L$
- *Features* de entalhe = $A * C + C * L + A * L$
- *Features* de depressão = $A * C + 2 * C * L + A * L$
- *Features* de rasgo = $A * C + 2 * C * L + 2 * A * L$
- *Features* de plano = $C * L$
- *Features* de furo = $\pi * D * A$
- *Features* de passo = $\pi * D_p + \pi * (D_g^2 * D_p^2) / 4$
- *Features* de chanfro = $\pi * (R_g + R_p) + [L^2 * (R_g + R_p)^2]^{0,5}$
- *Features* de arredondamento = $\pi^2 * (R_g - R_p) * R_p + 2 * \pi * (R_g - R_p)^2 * C * L$

O tempo improdutivo T_i , em (min) é calculado pela equação C.8.

$$T_i = T_c * (P_i / 100) \quad (\text{C.8})$$

Onde:

T_c – tempo improdutivo (min)

P_i – percentual de tempo improdutivo (%)

O tempo de troca de ferramenta T_{fr} em (min) é calculado pela equação C.9.

$$T_{fr} = ((T_c / T) + (1 / Z)) * T_{ft} \quad (\text{C.9})$$

Onde:

T_c – Tempo de corte (desbaste) da *feature* (min)

T – Tempo de vida da ferramenta (min)

Z – Número de peças do lote (unid)

T_{ft} – Tempo de troca de ferramenta (min)

O custo de fabricação C_f em (R\$) é calculado pela equação C.10.

$$C_f = (S_h / 60) * T_f + (S_m / 60) * T_f + C_{fr} \quad (\text{C.10})$$

Onde:

T_f – tempo de fabricação por recurso (min)

S_h – salário do operador (R\$/hora)

S_m – salário da máquina (R\$/hora)

C_{fr} – custo da (s) ferramenta (s) (R\$)

Como a estimativa do custo de usinagem de uma *feature* depende de diversos fatores, para facilitar a implementação computacional, e reduzir a quantidade de informações inseridas pelo usuário neste método serão usadas tabelas com o custo por volume em (R\$/mm³) para as *features*. Estas tabelas tem o custo por volume específicas para cada tipo de *feature*, material da peça, tolerância dimensional, e tamanho da peça.

Estas informações foram obtidas com um especialista em usinagem que passou os valores médios do custo de usinagem praticado pelo mercado em (R\$/h) em função do tamanho da máquina. A estimativa do custo da usinagem é influenciada pelo material a ser processado, pela precisão de acabamento, e pelo tamanho da peça a ser usinada. Quanto maior a peça a ser fabricada, mais difícil que uma fábrica ou prestador destes serviços tenha máquinas com esta capacidade. Isto se deve a baixa escala de produção de peças de grandes dimensões, como consequência o custo hora destes equipamentos também é maior. Estes valores podem ser vistos na tabela D1 que é inserida no banco de dados do SE para que possa realizar o cálculo de estimativa de custo de usinagem da *feature*. Para o cálculo da taxa de remoção pelo tempo em (mm³/h) foi considerada a velocidade usual para pastilhas de metal duro em relação ao material usinado. Para o torneamento foi considerado uma profundidade de corte de 3mm e um avanço por volta de 0,6mm. Para o fresamento foi considerada uma ferramenta de metal duro com 8 insertos e avanço de 0,15mm por inserto por volta, e profundidade de corte de 2mm por passe com largura de 10mm.

Além disto também no custo de usinagem é considerado o tempo de setup da máquina, por exemplo, quando uma máquina é usada especificamente para usinar uma *feature* como um rasgo de chaveta em um eixo. Neste caso o custo de setup é um índice que depende do tamanho da máquina multiplicado pelo custo hora da máquina, assim para que se tenha o custo da *feature* é somado o custo de setup mais o custo R\$/mm³ da *feature*. Este índice vale 0,2 para a fresadora menor, 0,7 para a

intermediária e 1,5 para a maior. A tabela C1 apresenta um fator que é usado para fazer a atualização dos preços, isto é feito periodicamente para manter coerência as análises.

Tabela C.1: Custo de usinagem por *feature* em R\$/mm³.

Feature: Torneamento					Feature: Fresamento						
Material	Precisão	Tamanho usinável	R\$/h	mm ³ /h	R\$/mm ³	Material	Precisão	Tamanho usinável	R\$/h	mm ³ /h	R\$/mm ³
SAE 1020	h9	800 x Ø300	68,00	21600000	0,000003	SAE 1020	h9	800 x 300 x 300	127,50	1145913	0,000111
		3000 x Ø500	93,50	21600000	0,000004			3000 x 1500 x 1500	187,00	1145913	0,000163
		6000 x Ø800	170,00	21600000	0,000008			6000 x 2000 x 2000	297,50	1145913	0,00026
	h7	800 x Ø300	71,40	21600000	0,000003		h7	800 x 300 x 300	133,88	1145913	0,000117
		3000 x Ø500	98,18	21600000	0,000005			3000 x 1500 x 1500	196,35	1145913	0,000171
		6000 x Ø800	178,50	21600000	0,000008			6000 x 2000 x 2000	312,38	1145913	0,000273
	k7	800 x Ø300	74,80	21600000	0,000003		k7	800 x 300 x 300	140,25	1145913	0,000122
		3000 x Ø500	102,85	21600000	0,000005			3000 x 1500 x 1500	205,70	1145913	0,00018
		6000 x Ø800	187,00	21600000	0,000009			6000 x 2000 x 2000	327,25	1145913	0,000286
SAE 1045	h9	800 x Ø300	80,00	19440000	0,000004	SAE 1045	h9	800 x 300 x 300	150,00	1031322	0,000145
		3000 x Ø500	110,00	19440000	0,000006			3000 x 1500 x 1500	220,00	1031322	0,000213
		6000 x Ø800	200,00	19440000	0,000010			6000 x 2000 x 2000	350,00	1031322	0,000339
	h7	800 x Ø300	84,00	19440000	0,000004		h7	800 x 300 x 300	157,50	1031322	0,000153
		3000 x Ø500	115,50	19440000	0,000006			3000 x 1500 x 1500	231,00	1031322	0,000224
		6000 x Ø800	210,00	19440000	0,000011			6000 x 2000 x 2000	367,50	1031322	0,000356
	k7	800 x Ø300	88,00	19440000	0,000005		k7	800 x 300 x 300	165,00	1031322	0,00016
		3000 x Ø500	121,00	19440000	0,000006			3000 x 1500 x 1500	242,00	1031322	0,000235
		6000 x Ø800	220,00	19440000	0,000011			6000 x 2000 x 2000	385,00	1031322	0,000373
GG 20	h9	800 x Ø300	88,00	8640000	0,000010	GG 20	h9	800 x 300 x 300	165,00	343773,9	0,00048
		3000 x Ø500	121,00	8640000	0,000014			3000 x 1500 x 1500	242,00	343773,9	0,000704
		6000 x Ø800	220,00	8640000	0,000025			6000 x 2000 x 2000	385,00	343773,9	0,00112
	h7	800 x Ø300	92,40	8640000	0,000011		h7	800 x 300 x 300	173,25	343773,9	0,000504
		3000 x Ø500	127,05	8640000	0,000015			3000 x 1500 x 1500	254,10	343773,9	0,000739
		6000 x Ø800	231,00	8640000	0,000027			6000 x 2000 x 2000	404,25	343773,9	0,001176
	k7	800 x Ø300	96,80	8640000	0,000011		k7	800 x 300 x 300	181,50	343773,9	0,000528
		3000 x Ø500	133,10	8640000	0,000015			3000 x 1500 x 1500	266,20	343773,9	0,000774
		6000 x Ø800	242,00	8640000	0,000028			6000 x 2000 x 2000	423,50	343773,9	0,001232
GGG 40	h9	800 x Ø300	92,00	7560000	0,000012	GGG 40	h9	800 x 300 x 300	172,50	401069,5	0,00043
		3000 x Ø500	126,50	7560000	0,000017			3000 x 1500 x 1500	253,00	401069,5	0,000631
		6000 x Ø800	230,00	7560000	0,000030			6000 x 2000 x 2000	402,50	401069,5	0,001004
	h7	800 x Ø300	96,60	7560000	0,000013		h7	800 x 300 x 300	181,13	401069,5	0,000452
		3000 x Ø500	132,83	7560000	0,000018			3000 x 1500 x 1500	265,65	401069,5	0,000662
		6000 x Ø800	241,50	7560000	0,000032			6000 x 2000 x 2000	422,63	401069,5	0,001054
	k7	800 x Ø300	101,20	7560000	0,000013		k7	800 x 300 x 300	189,75	401069,5	0,000473
		3000 x Ø500	139,15	7560000	0,000018			3000 x 1500 x 1500	278,30	401069,5	0,000694
		6000 x Ø800	253,00	7560000	0,000033			6000 x 2000 x 2000	442,75	401069,5	0,001104
AL 6061	h9	800 x Ø300	100,00	12600000	0,000008	AL 6061	h9	800 x 300 x 300	187,50	802139	0,000234
		3000 x Ø500	137,50	12600000	0,000011			3000 x 1500 x 1500	275,00	802139	0,000343
		6000 x Ø800	250,00	12600000	0,000020			6000 x 2000 x 2000	437,50	802139	0,000545
	h7	800 x Ø300	105,00	12600000	0,000008		h7	800 x 300 x 300	196,88	802139	0,000245
		3000 x Ø500	144,38	12600000	0,000011			3000 x 1500 x 1500	288,75	802139	0,00036
		6000 x Ø800	262,50	12600000	0,000021			6000 x 2000 x 2000	459,38	802139	0,000573
	k7	800 x Ø300	110,00	12600000	0,000009		k7	800 x 300 x 300	206,25	802139	0,000257
		3000 x Ø500	151,25	12600000	0,000012			3000 x 1500 x 1500	302,50	802139	0,000377
		6000 x Ø800	275,00	12600000	0,000022			6000 x 2000 x 2000	481,25	802139	0,0006

Fonte: Própria.

C.1. Referências Bibliográficas

PONTES, H. L. J., PORTO, A. J. V., “Um modelo para simulação de sistemas de manufatura baseado na tecnologia de *features*” Revista Gestão Industrial, ISSN 1808-0448, vol. 9, nº 1, pp. 79-107, 2013.

ANEXO D: FUNÇÕES DE APLICAÇÃO DE CADA TIPO DE COMPONENTE.

Tabela D.1: Características dos diferentes tipos de rolamento e buchas, parte 1

Requisito de aplicação	Rolamento rígido de esferas	Mancal com rolamento rígido de esfera + bucha	Rolamento de esferas de contato angular	Rolamento de esferas contato angular combinado	Rolamento autocompensador de esferas	Rolamento autocompensador de esferas com Bucha
Carga radial.	Média	Média	Média	Média	Média	Média
Carga axial em uma direção.	Média	Média	Média	Média a alta, depende do arranjo	Baixa	Baixa
Carga axial em ambas as direções	Média	Média	Não possui	Média	Baixa	Baixa
Carga combinada.	Média	Média	Média	Média	Baixa	Baixa
Tolerância a carga de choque.	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Muito baixa	Muito baixa
Velocidade giro.	Alta	Média	Alta	Alta	Média	Média
Precisão de giro.	Baixa a média, depende da classe de folga	Baixa	Média	Alta se montado em pares e pré carregado	Baixa	Média, depende do ajuste de folga pela bucha
Rigidez.	Baixa	Baixa	Baixa	Alta se montado em pares e pré-carregado	Baixa	Baixa
Torque.	Muito baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Muito baixo	Muito baixo
Ruído.	Funcionamento muito silencioso	Funcionamento silencioso	Funcionamento o silencioso	Funcionamento muito silencioso	Funcionamento pouco silencioso	Funcionamento pouco silencioso
Compensam desalinhamentos.	Não	No máximo 2°	Não	Não	No máximo 3°	No máximo 3°
Tolerância ao desalinhamento.	Pouco com folga acima de C3	Não	Não	Não	Sim	Sim
Atua como lado livre.	Sim	Sim	Não é possível	Não é possível	Sim	Sim
Atua como lado fixo.	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Compensação linear no rolamento	Não	Não	Não	Não	Não	Não
Compensação linear axial por ajuste livre.	No anel interno ou externo	No anel externo	Não é possível	Não é possível	No anel interno ou externo	No anel externo
Vedação.	Sem vedação, em um lado ou ambos	Apenas vedado	Sem vedação	Sem vedação	Sem alguns tamanhos e fabricantes fornecem vedado	Sem alguns tamanhos e fabricantes fornecem vedado
Rolamento separável.	Não	Não	Não	Não	Não	Não
Furo cônico.	Não disponível	É padrão	Não disponível	Não disponível	Com e sem	É padrão
Ajuste de folga.	Não ajusta	Não ajusta	Ajusta a folga axial com porca KM	Ajusta a folga axial com porca KM	Não ajusta	Radial se montado com bucha de desmontagem
Funciona sem lubrificação.	Apenas lubrificado	Apenas lubrificado	Apenas lubrificado	Apenas lubrificado	Apenas lubrificado	Apenas lubrificado
Geração de calor.	Muito baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Muito baixa	Muito baixa
Amortecimento.	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo
Mantem a forma do eixo.	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Compacto na direção axial.	Nas séries mais leves	Não	Nas séries mais leves	Nas séries mais leves	Não	Não
Compacto na direção radial.	Não	Não	Não	Não	Não	Não
Custo.	Baixo para as séries comuns	Baixo para as séries comuns	Médio, usar as séries comuns	Médio, usar as séries comuns	Médio, usar as séries comuns	Médio, usar as séries comuns
Disponibilidade e logística.	Comuns séries 62, 63 e 60	Comuns séries 62K e 63K	Comuns nas séries 72 e 73	Comuns nas séries 32 e 33	Comuns nas séries 12 e 22	Comuns nas séries 12K e 22K
Dispensa usinagem de precisão no eixo	Não	Sim	Não	Não	Não	Sim
Dispensa rugosidade controlada no eixo	Não	Sim	Não	Não	Não	Sim
Gera variação na folga radial do eixo	Não	Não	Não	Não	Não	Não
Montagem/desmontagem rápida	Não	Sim	Não	Não	Não	Sim
Dispensa a fabricação do alojamento.	Não	Sim	Não	Não	Não	Não
Tolerância à fadiga.	Baixa	Baixa	Média	Média a alta, depende do arranjo	Baixa	Baixa

Fonte: Própria.

Tabela D.2: Características dos diferentes tipos de rolamento e buchas, parte 2.

Requisito de aplicação	Mancal + Bucha Rolamento autocompensador de esferas	Rolamento de rolo cilíndrico	Rolamento de rolo cônico	Rolamento de rolo cônico combinado	Rolamento autocompensador de rolos	Rolamento autocompensador de rolos + Bucha
Carga radial.	Média	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta
Carga axial em uma direção.	Baixa	Não possui	Alta	Alta	Média	Média
Carga axial em ambas as direções	Baixa	Não possui	Não possui	Alta	Média	Média
Carga combinada	Baixa	Não possui	Média	Alta	Média	Média
Tolerância a carga de choque	Muito baixa	Média	Média	Alta	Alta	Alta
Velocidade giro	Média	Alta	Média	Média	Média	Média
Precisão de giro	Média, depende do ajuste de folga pela bucha	Média	Média	Alta se montado em pares e pre carregado	Baixa	Média, depende do ajuste de folga pela bucha
Rigidez	Baixa	Alta	Média	Alta se montado em pares e pré- carregado	Alta	Alta
Torque	Muito baixo	Baixo	Moderato	Moderato	Moderato	Moderato
Ruído	Pouco silencioso	Silencioso	Pouco silencioso	Pouco silencioso	Pouco silencioso	Pouco silencioso
Compensam desalinhamentos	No máximo 3°	Não	Não	Não	No máximo 2,5°	No máximo 2,5°
Tolerância ao desalinhamento	Sim	Não	Não	Não	Sim	Sim
Atua como lado livre	Sim	Sim	Não é possível	Não é possível	Sim	Sim
Atua como lado fixo	Sim	Não é possível	Sim	Sim	Sim	Sim
Compensação linear no rolamento	Não	Sim	Não	Não	Não	Não
Compensação linear axial por ajuste livre	No anel externo	Não é possível	Pouco aplicável	Pouco aplicável	No anel interno ou externo	No anel externo
Vedação	Sem vedação, alguns tamanhos e fabricantes fornecem vedado	Sem vedação	Sem vedação	Sem vedação	Sem vedação, alguns tamanhos e fabricantes fornecem vedado	Sem vedação, alguns tamanhos e fabricantes fornecem vedado
Rolamento separável	Não	Sim	Sim	Sim	Não	Não
Furo cônico.	É padrão	Poucos fabricantes fazem	Não disponível	Não disponível	Disponível com e sem furo cônico	É padrão
Ajuste de folga	Radial se montado com bucha de desmontagem	Não ajusta	Ajusta a folga axial com porca KM	Ajusta a folga axial com porca KM	Não ajusta	Radial se montado com bucha de desmontagem
Funciona sem lubrificação	Apenas lubrificado	Apenas lubrificado	Apenas lubrificado	Apenas lubrificado	Apenas lubrificado	Apenas lubrificado
Geração de calor	Muito baixa	Muito baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
Amortecimento	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo
Mantem a forma do eixo	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Compacto na direção axial.	Não	Nas séries mais leves	Nas séries mais leves	Nas séries mais leves	Não	Não
Compacto na direção radial	Não	Não	Não	Não	Não	Não
Custo	Médio a alto, usar as séries mais comuns					
Disponibilidade e logística	Comuns nas séries 12K e 22K	Comuns nas séries NU2 e NU3	Mais comum na série 322	Mais comum na série 322	Mais comuns nas séries 222 e 223	Comuns nas séries 222K e 223K
Dispensa usinagem de precisão no eixo	Sim	Não	Não	Não	Não	Sim
Dispensa rugosidade controlada no eixo	Sim	Não	Não	Não	Não	Sim
Gera variação na folga radial do eixo	Não	Não	Não	Não	Não	Não
Montagem e desmontagem rápida	Sim	Não	Não	Não	Não	Sim
Dispensa a fabricação do alojamento	Sim	Não	Não	Não	Não	Não
Tolerância à fadiga	Baixa	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta

Fonte: Própria

Tabela D.3: Características dos diferentes tipos de rolamento e buchas, parte 3.

Requisito de aplicação	Mancal com rolamento autocompensador de rolos e bucha	Rolamento axial de esferas	Rolamento axial de esferas de dupla carreira	Buchas radiais	Buchas axiais	Buchas radial e axial
Carga radial.	Alta	Não possui	Não possui	Depende da velocidade	Não possui	Depende da velocidade
Carga axial em uma direção	Média	Média	Média	Não possui	Depende da velocidade	Depende da velocidade
Carga axial em ambas as direções	Média	Não possui	Média	Não possui	Não possui	Não possui
Carga combinada.	Média	Não possui	Não possui	Não possui	Não possui	Depende da velocidade
Tolerância a carga de choque.	Alta	Baixa	Baixa	Muito alta	Muito alta	Muito alta
Velocidade giro	Média	Média	Média	Baixa, velocidades mais altas precisam de sistemas de lubrificação adaptados		
Precisão de giro	Média, depende do ajuste de folga pela bucha	Média	Baixa	Muito baixa	Muito baixa	Muito baixa
Rigidez	Alta	Média	Média	Baixa	Baixa	Baixa
Torque	Moderato	Moderato	Moderato	Alto, o maior de em mancalizações		
Ruído	Pouco silencioso					
Compensam desalinhamentos	No máximo 2,5°	Não	Não	Não	Não	Não
Tolerância ao desalinhamento	Sim	Não	Não	Pouco, depende das folgas	Pouco, depende das folgas	Pouco, depende das folgas
Atua como lado livre	Sim	Não é possível	Não é possível	Sim	Não é possível	Sim
Atua como lado fixo	Sim	Não é possível	Sim	Não é possível	Não é possível	Não é possível
Compensação linear no rolamento	Não	Não	Não	Sim	Não	Não
Compensação linear axial por ajuste livre	No anel externo	Não é possível	Não é possível	Não é possível	Não é possível	Não é possível
Vedação	Sem vedação, alguns tamanhos e fabricantes fornecem vedado	Sem vedação	Sem vedação	Sem vedação	Sem vedação	Sem vedação
Rolamento separável	Não	Não	Não	Não	Não	Não
Furo cônico	É padrão	Não disponível	Não disponível	Não disponível	Não disponível	Não disponível
Ajuste de folga	Ajusta a folga radial se montado com bucha de desmontagem	Não ajusta	Não ajusta	Não ajusta	Não ajusta	Não ajusta
Funciona sem lubrificação	Apenas lubrificado	Apenas lubrificado	Apenas lubrificado	Pode operar sem lubrificação	Pode operar sem lubrificação	Pode operar sem lubrificação
Geração de calor	Baixa	Muito baixa	Baixa	Muito alta, pode ser compensado com sistemas que resfriam o lubrificante		
Amortecimento.	Baixo	Baixo	Baixo	Alto	Alto	Alto
Mantem a forma do eixo	Sim	Sim	Sim	Não, gera desgaste do eixo		
Compacto na direção axial	Não	Não	Não	Não	O mais compacto	Não
Compacto na direção radial	Não	Não	Não	O mais compacto	Não	Não
Custo	Médio a alto, usar as séries comuns			Baixo	Baixo	Baixo
Disponibilidade e logística	Mais comuns nas séries 222K e 223K	Mais comum na série 512	Mais comum na série 522	Mais comuns na relação $\varnothing \times$ largura de 1:1 a 1:1,5	Mais comuns na relação $\varnothing_i \times \varnothing_e$ 1,5 a 2	Mais comuns na relação $\varnothing \times$ largura de 1:1 a 1:1,7
Dispensa usinagem de precisão no eixo	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não
Dispensa rugosidade controlada no eixo	Sim	Sim	Sim	Não, é um fator crítico na vida da bucha	Não, é um fator crítico na vida da bucha	Não, é um fator crítico na vida da bucha
Gera variação na folga radial do eixo	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim
Montagem e desmontagem rápida	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Dispensa a fabricação do alojamento	Sim	Não	Não	Não	Não	Não
Tolerância à fadiga	Alta	Média	Média	Alta	Alta	Alta

Fonte: Própria

Tabela D.4: Características dos diferentes tipos elementos de transmissão, parte 1.

Requisito de aplicação	Corrente	Correia sincronizada Poliuretano	Correia sincronizada Neoprene	Correia em V
Velocidade e carga	Mais indicada para aplicações de médias a baixas velocidades onde predomina elevados esforços.	Indicada para aplicações de altas até baixas velocidades e esforços.	Indicada para aplicações de altas até baixas velocidades e esforços baixos a médios.	Deve ser aplicada para velocidades médias a altas e esforços baixos a médios.
Sincronização	Com sincronização de eixos	Com sincronização de eixos	Com sincronização de eixos	Sem sincronização de eixos
Sem Lubrificação	Utiliza lubrificação, em alguns casos certos tipos de corrente podem trabalhar sem, porem limitam as aplicações	Sem lubrificação	Sem lubrificação	Sem lubrificação
Inércia	Conjunto com elevado peso e inércia	Conjunto com baixo peso e inércia, principalmente se usadas polias de alumínio	Conjunto com baixo peso e inércia, principalmente se usadas polias de alumínio	Conjunto com elevado peso e inércia, principalmente se usadas em alta potência. Em baixa potência as polias de alumínio têm vida curta devido ao desgaste
Elongação	Elevada elongação necessitando de constantes ajustes para manter o tensionamento correto ou o uso de tensionadores.	Sem elongação.	Elongação muito baixa.	Elongação média necessitando de eventuais ajustes para manter o tensionamento correto ou o uso de tensionadores.
Espaço Utilizado	Pouco espaço utilizado principalmente em largura exceto se em muito baixas velocidades e elevadas relações de transmissão	Pouco espaço utilizado principalmente em largura exceto se em muito baixas velocidades e elevadas relações de transmissão.	Médio espaço utilizado principalmente em largura exceto se em muito baixas velocidades e elevadas relações de transmissão.	Grande espaço utilizado principalmente em baixas velocidades e elevadas relações de transmissão.
Relação de transmissão	Baixas relações de transmissão normalmente menores que 1:8	Baixas relações de transmissão normalmente menores que 1:6	Baixas relações de transmissão normalmente menores que 1:6	Baixas relações de transmissão normalmente menores que 1:6
Direção dos eixos	Eixos paralelos	Eixos paralelos	Eixos paralelos	Eixos paralelos
Grandes distancias entre centros	Permite grandes distancias entre centros e variação da mesma que depende da metade do passo da corrente	Permite médias distancias entre centros e variação da mesma que depende da oferta de comprimento das correias	Permite médias distancias entre centros e variação da mesma que depende da oferta de comprimento das correias	Permite grandes distancias entre centros e variação da mesma que depende da oferta de comprimento das correias
Acionam vários eixos	Possível acionar grande quantidade de eixos	Possível acionar vários eixos	Possível acionar vários eixos	Possível acionar vários eixos, deve-se observar o ângulo de abraçamento das polias
Acionam vários eixos contrários	Naturalmente aciona eixos em direções iguais e contrárias	Aciona eixos em direções iguais, para direções contrárias depende de correias com denteado nos dois lados	Aciona eixos em direções iguais, para direções contrárias depende de correias com denteado nos dois lados	Aciona eixos em direções iguais, para direções contrárias depende da disponibilidade de correias hexagonais
Ambiente de Aplicação	Resistente a altas temperaturas e agentes químicos, dependente da resistência do lubrificante	Não resiste a altas temperaturas, os agentes químicos podem atacar o poliuretano	Não resiste a altas temperaturas, os agentes químicos podem atacar o neoprene	Não resiste a altas temperaturas, os agentes químicos podem atacar a borracha.
Flexibilidade de layout	Alta flexibilidade de layout	Média flexibilidade de layout	Média flexibilidade de layout	Baixa flexibilidade de layout
Disponibilidade e logística	Alta disponibilidade, vários fabricantes locais, fácil logística.	Baixa disponibilidade, apenas um fabricante mundial, logística complexa pois depende de importação.	Média disponibilidade, vários fabricantes, logística média depende da região.	Alta disponibilidade, vários fabricantes locais, fácil logística.
Manutenção - Facilidade	Manutenção simples.	Manutenção simples.	Manutenção simples.	Manutenção simples.
Manutenção - Frequência	Frequência elevada em função da elongação e da lubrificação	Frequência baixa	Frequência baixa	Frequência média em função do tensionamento e do desgaste de correias e polias
Absorção de choques	Média absorção de choques	Baixa absorção de choques	Média absorção de choques	Elevada absorção de choques
Vibração e ruído	Médio índice de vibração, e ruído	Médio índice de vibração, elevado índice de ruído	Médio índice de vibração, elevado índice de ruído	Baixo índice de vibração e ruído
Carregamento nos mancais	Baixo carregamento nos mancais	Baixo carregamento nos mancais	Baixo carregamento nos mancais	Médio carregamento nos mancais
Custo relativo	Baixo custo	Alto custo	Médio custo	Baixo custo
Eficiência	Elevada eficiência em torno de 98%	Elevada eficiência em torno de 98%	Elevada eficiência em torno de 98%	Média eficiência em torno de 94 a 97%

Fonte: Própria

Tabela D.5: Características dos diferentes tipos elementos de transmissão, parte 2.

Requisito de aplicação	Correia micro V	Engrenagem Helicoidal	Engrenagem Dente Reto	Coroa e Sem Fim
Velocidade e carga	Deve ser aplicada para velocidades médias a altas e esforços baixos a médios.	Pode ser bem aplicado tanto em velocidades e esforços de baixos a elevados	Aplicado em velocidades médias a baixas e esforços de baixos a elevados	Aplicado em velocidades médias a baixas e esforços e potências baixas
Sincronização	Sem sincronização de eixos	Com sincronização de eixos	Com sincronização de eixos	Com sincronização de eixos
Sem Lubrificação	Sem lubrificação	Utiliza lubrificação	Utiliza lubrificação	Utiliza lubrificação
Inércia	Conjunto com elevado peso e inércia, principalmente se usadas em alta potência. Em baixa potência as polias de alumínio têm vida curta devido ao desgaste	Conjunto com baixo peso e inércia.	Conjunto com baixo peso e inércia.	Conjunto com baixo peso e inércia, principalmente em grandes relações de transmissão.
Elongação	Elongação média necessitando de eventuais ajustes para manter o tensionamento correto ou o uso de tensionadores.	Sem alongação.	Sem alongação.	Sem alongação.
Espaço Utilizado	Grande espaço utilizado principalmente em baixas velocidades e elevadas relações de transmissão.	Elemento compacto em qualquer situação de aplicação.	Elemento compacto em qualquer situação de aplicação.	Elemento mais compacto de todos, principalmente em grandes relações de transmissão.
Relação de transmissão	Baixas relações de transmissão normalmente menores que 1:8	Baixas relações de transmissão normalmente menores que 1:8. Para grandes relações podem ser montados trens de engrenagens	Baixas relações de transmissão normalmente menores que 1:8. Para grandes relações podem ser montados trens de engrenagens	Permite altíssimas relações de transmissão em um par, até 100:1
Direção dos eixos	Eixos paralelos	Eixos paralelos e ortogonais	Eixos paralelos e ortogonais	Eixos ortogonais
Grandes distancias entre centros	Permite médias distancias entre centros e variação da mesma que depende da oferta de comprimento das correias	Usada em transmissões compactas, a distância entre centros é fixa, e é a soma da metade dos diâmetros primitivos	Usada em transmissões compactas, a distância entre centros é fixa, e é a soma da metade dos diâmetros primitivos	Usada em transmissões compactas, a distância entre centros é fixa, e é a soma da metade dos diâmetros primitivos
Acionam vários eixos	Possível acionar vários eixos, deve-se observar o ângulo de abraçamento das polias	Possível acionar vários eixos, deve-se observar o espaço para evitar colisões.	Possível acionar vários eixos, deve-se observar o espaço para evitar colisões.	Possível acionar somente um eixo, o segundo requer construções especiais
Acionam vários eixos contrários	Apenas aciona eixos em direções iguais.	Apenas aciona eixos em direções contrárias, para a mesma direção é necessário o uso de outra engrenagem.	Apenas aciona eixos em direções contrárias, para a mesma direção é necessário o uso de outra engrenagem.	Apenas aciona eixos em direções iguais.
Ambiente de Aplicação	Não resiste a altas temperaturas, os agentes químicos podem atacar a borracha.	Resiste a altas temperaturas dependendo da qualidade do lubrificante, os agentes químicos normalmente não atuam pois estão enclausuradas em carcaças	Resiste a altas temperaturas dependendo da qualidade do lubrificante, os agentes químicos normalmente não atuam pois estão enclausuradas em carcaças	Resiste a altas temperaturas dependendo da qualidade do lubrificante, os agentes químicos normalmente não atuam pois estão enclausuradas em carcaças
Flexibilidade de layout	Média flexibilidade de layout	Baixa flexibilidade de layout	Baixa flexibilidade de layout	Baixa flexibilidade de layout
Disponibilidade e logística	Baixa disponibilidade, poucos fabricantes, logística média depende da região.	Média disponibilidade, vários fabricantes, logística média depende da região.	Média disponibilidade, vários fabricantes, logística média depende da região.	Média disponibilidade, vários fabricantes, logística média depende da região.
Manutenção - Facilidade	Manutenção simples.	Manutenção complexa exige mão de obra qualificada	Manutenção complexa exige mão de obra qualificada	Manutenção complexa exige mão de obra qualificada
Manutenção - Frequência	Frequência média em função do tensionamento e do desgaste de correias e polias	Frequência baixa, atrelada a vida do lubrificante	Frequência baixa, atrelada a vida do lubrificante	Frequência média em função da lubrificação e do desgaste de coroa
Absorção de choques	Elevada absorção de choques	Baixa absorção de choques	Baixa absorção de choques	Baixa absorção de choques
Vibração e ruído	Baixo índice de vibração e ruído	Alto índice de vibração, médio índice de ruído	Alto índice de vibração, médio índice de ruído	Alto índice de vibração, médio índice de ruído
Carregamento nos mancais	Médio carregamento nos mancais	Baixo carregamento nos mancais, mas em duas direções	Baixo carregamento nos mancais	Baixo carregamento nos mancais, mas em duas direções
Custo relativo	Médio custo	Médio a alto	Médio custo	Baixo custo
Eficiência	Média eficiência em torno de 94 a 97%	Elevada eficiência em torno de 98 a 99%	Elevada eficiência em torno de 98 a 99%	Baixa eficiência depende da relação de transmissão, varia de 45 a 85%

Fonte: Própria

Tabela D.6: Características dos diferentes tipos elementos de fixação cubo-eixo.

Requisito de aplicação	Bucha QD	Bucha TL	Anel Fixação	Chaveta
Possibilidade de fixação radial sem chaveta.	Se o torque a ser transmitido não é elevado pode ser usada sem chaveta	Se o torque a ser transmitido não é elevado pode ser usada sem chaveta	Não usa nenhum entalhe, apenas por pressão	O torque é transmitido pelo entalhe da chaveta no cubo e no eixo
Possibilidade de fixação axial sem entalhe	Não necessita, pois fixa-se por pressão	Não necessita, pois fixa-se por pressão	Não necessita, pois fixa-se por pressão	Necessita de meios para a fixação axial como rebaixos e arruelas com parafusos, anéis elásticos, ou prisioneiros
Possibilidade de ajuste radial	Se o torque a ser transmitido não é elevado pode ser usada sem chaveta daí o ajuste radial é possível	Se o torque a ser transmitido não é elevado pode ser usada sem chaveta daí o ajuste radial é possível	Permite ajuste radial sem limites	Não permite ajuste radial, a chaveta restringe.
Possibilidade de ajuste axial	Se não usa chaveta o único limitante pode ser um rebaixo, se usa chaveta o comprimento desta e um possível rebaixo podem limitar o ajuste	Se não usa chaveta o único limitante pode ser um rebaixo, se usa chaveta o comprimento desta e um possível rebaixo podem limitar o ajuste	Permite ajuste axial sem limites desde que não haja rebaixos.	É limitado pelo comprimento da chaveta desde que não use elementos de restrição como anéis elásticos ou rebaixos
Precisão da usinagem do eixo	Por usar sistema cônico de fixação pode ser usado em eixos com precisão melhor ou igual h9. Não é necessário usinar radialmente se usar barra redonda trefilada ou retificada	Por usar sistema cônico de fixação pode ser usado em eixos com precisão melhor ou igual h9. Não é necessário usinar radialmente se usar barra redonda trefilada ou retificada	Por usar sistema cônico de fixação pode ser usado em eixos com precisão melhor ou igual h9. Não é necessário usinar radialmente se usar barra redonda trefilada ou retificada	Como exige um ajuste H7/k7 ou superior é necessária precisão, apenas obtida com eixo retificado ou eixos usinados radialmente
Precisão/complexidade usinagem cubo	Exige usinagem precisa e complexa do cubo com furo cônico e furos dos parafusos de fixação	Exige usinagem precisa e complexa do cubo com furo cônico e furos dos parafusos de fixação	Usinagem simples e sem precisão	Usinagem simples, porém com precisão
Rapidez montagem/desmontagem	Processo fácil e rápido, agiliza a manutenção	Processo fácil e rápido, agiliza a manutenção	Processo fácil e rápido, agiliza a manutenção	Depende do tamanho do eixo e do ajuste, além dos meios previstos para a montagem. Em uma desmontagem se houver ocorrência de fretting pode se tornar uma atividade muito complexa e demorada.
Sem ferramenta para desmontagem	Usa apenas chave de aperto dos parafusos, agiliza a manutenção	Usa apenas chave de aperto dos parafusos, agiliza a manutenção	Usa apenas chave de aperto dos parafusos, agiliza a manutenção	Dependendo do caso usa chave de aperto dos prisioneiros, alicates para anel elástico, sacadores e eventualmente outras ferramentas para desmontagem principalmente se houver ocorrência de fretting
Custo de manutenção	Baixo em função da rapidez e simplicidade para fixar e soltar	Baixo em função da rapidez e simplicidade para fixar e soltar	Baixo em função da rapidez e simplicidade para fixar e soltar	Elevado a muito elevado dependendo de como está o eixo e o cubo quando da desmontagem.
Baixa pressão radial no cubo	A pressão radial depende da aplicação, se for sem chaveta apresenta um grau média, se usada a chaveta de médio a baixa.	A pressão radial depende da aplicação, se for sem chaveta apresenta um grau média, se usada a chaveta de médio a baixa.	Elevada pressão radial pois a transferência de torque é dada apenas pela força de atrito.	Baixa pressão radial, pois, a transferência de torque é dada pela chaveta
Baixa ocorrência de fretting	Baixa ocorrência em função do aperto causado pelo sistema cônico	Baixa ocorrência em função do aperto causado pelo sistema cônico	Baixa ocorrência em função do aperto causado pelo sistema cônico	Ocorrência maior em função do ajuste
Reduzido diâmetro do cubo	Dos elementos com sistema cônico tem o cubo de diâmetro entre bucha TL e o anel de fixação, porém deve ser avaliado a relação entre tamanho da bucha e diâmetro do eixo o que permite uma comparação com outros elementos com sistema cônico	Dos elementos com sistema cônico tem o cubo de menor diâmetro, porém deve ser avaliado a relação entre tamanho da bucha e diâmetro do eixo o que permite uma comparação com outros elementos com sistema cônico	Dos elementos com sistema cônico tem geralmente o cubo de maior diâmetro em função das elevadas pressões radiais.	Cubo compacto
Peso/Inércia	Entre as buchas a menos compacta pois possui flange, deve ser avaliado a relação entre tamanho da bucha e diâmetro do eixo o que permite uma comparação com outros elementos com sistema cônico	Bucha compacta pois não tem flange, deve ser avaliado a relação entre tamanho da bucha e diâmetro do eixo o que permite uma comparação com outros elementos com sistema cônico	Dos elementos com sistema cônico é o mais compacto.	O mais compacto de todos os elementos, além de baixo peso e inércia
Custo do componente	Componentes mais caros	Componentes mais caros	Possui custo maior que chavetas e menor que as buchas	O mais barato
Disponibilidade/Logística	Mais difíceis de achar, mas estão se popularizando principalmente em polias e engrenagens. Disponível em eixos de diâmetro até 210mm.	Mais difíceis de achar, mas estão se popularizando principalmente em polias e engrenagens. Disponível em eixos de diâmetro até 180mm.	Está começando a ser usado por sua versatilidade, porém poucos fornecedores os disponibilizam. Possui vários modelos, e disponibilidade para eixos de diâmetro até 900mm.	O mais comum e fácil de achar de todos os elementos. Facilmente achado para diâmetros até 150mm.
Absorção de sobrecarga	Desde que usado em aplicação de baixo torque que não requer o uso de chaveta, e torque máximo permitido depende do aperto dos parafusos de fixação	Desde que usado em aplicação de baixo torque que não requer o uso de chaveta, o torque máximo permitido depende do aperto dos parafusos de fixação	Permite, e o torque máximo permitido depende do aperto dos parafusos de fixação	Não permite esta funcionalidade pois a chaveta restringe

Fonte: Própria

Tabela D.7: Características de aplicação dos diferentes tipos de eixos.

Requisito de aplicação	Barra Laminada	Barra Trefilada	Barra Retificada	Tubo Mecânico	Tubo Trefilado
Possível eixo sem usinagem radial	Devido ao acabamento e baixa precisão sempre será preciso a usinagem radial.	Permite o uso de sistemas de fixação por ajuste cônico sem necessidade de usinagem, tolerância h9	Não é necessário usinagem radial, pode ser fornecida com tolerância h7.	Devido ao acabamento e baixa precisão sempre será preciso a usinagem radial.	Permite o uso de sistemas de fixação por ajuste cônico sem necessidade de usinagem, tolerância h9
Usinagem de features profundas	Sem limitação	Sem limitação	Sem limitação	Possível com restrição, verificar a espessura do tubo	Não é possível pela pouca espessura
Flexibilidade de geometria/layout	Sem limitação	Sem limitação	Sem limitação	Possível com restrição, verificar a espessura do tubo	A geração de geometria é limitada pela espessura do tubo
Relação peso/inércia elevada (dinâmica)	Baixa	Baixa	Baixa	Média	Elevada, função do diâmetro e espessura da parede
Relação peso/rigidez elevada (cargas)	Baixa	Baixa	Baixa	Média	Elevada, função do diâmetro e espessura da parede
Suporte a pressão radial	Sem limitação	Sem limitação	Sem limitação	Dependente da espessura da parede	Dependente da espessura da parede
Custo por peso	Mais barato	Preço intermediário	Mais caro	Preço intermediário	Preço intermediário
Disponibilidade e Logística	Fácil de achar	Fácil de achar	Disponível apenas em distribuidores especializados	Disponível apenas em distribuidores especializados	Disponível apenas em distribuidores especializados
Variedade de ligas e materiais	Disponível na mais ampla variedade de ligas e materiais	Disponível na mais ampla variedade de ligas e materiais	Restrito a um conjunto menor de ligas comerciais	Disponibilidade reduzida a apenas alguns tipos de aço ao carbono	Disponibilidade reduzida a apenas alguns tipos de aço ao carbono
Concentração de tensões/features	Menos propenso	Menos propenso	Menos propenso	Depende da espessura da parede	Mais susceptível
Balanceamento	Em estado totalmente ou parcialmente bruto requer balanceamento.	Baixa necessidade devido à alta qualidade geométrica	Baixa necessidade devido à alta qualidade geométrica	Sempre irá requerer balanceamento, a menos que o eixo seja curto e possa ser totalmente usinado	Baixa necessidade devido à alta qualidade geométrica
Processo de tratamento térmico	Facilidade de encontrar ligas termicamente tratáveis	Facilidade de encontrar ligas termicamente tratáveis	Limitado pois o fornecimento padrão de ligas termicamente tratáveis é reduzido	Não são tratáveis termicamente pois os materiais e ligas disponíveis no mercado não permitem	Não são tratáveis termicamente pois os materiais e ligas disponíveis no mercado não permitem

Fonte: Própria

ANEXO E: FORMUÁRIO DE CÁLCULO DO GRUPO FIXAÇÃO CUBO-EIXO E SUAS INTERFACES.**Chavetas:**

Para o dimensionamento da chaveta será usado o padrão DIN 6885:1968 que é o mais comum. Seu dimensionamento será feito por 4 critérios, a tensão cisalhante da chaveta, tensão de esmagamento da chaveta, do eixo e do cubo. O SE escolherá o maior comprimento de chaveta em função da situação mais crítica das tensões de cisalhamento e esmagamento. Para o processo de dimensionamento serão feitas as seguintes perguntas:

- Tensão de escoamento da chaveta σ_{ch} (MPa) – Padrão SAE 1045 LF = 531MPa
- Tensão de escoamento do eixo σ_{eixo} (MPa) – Padrão SAE 1045 LF = 531MPa
- Tensão de escoamento do cubo σ_{cubo} (MPa) – Padrão GG20 = 180MPa
- Torque a ser transmitido T (Nm)
- Diâmetro do eixo d onde o elemento de fixação cubo-eixo é montado (mm)
- Diâmetro do eixo d_{eixo} (mm)
- Espessura da parede do eixo S quando for um tubo (mm)
- Diâmetro do cubo D_{cubo} (mm)
- Comprimento do cubo L_{cubo} (mm)

Obs.: As tensões dos materiais estão previamente definidas no SE, porém se o usuário usar um material diferente do que foi arbitrado como padrão nesta pergunta apenas preenche com as tensões do material a ser usado. O objetivo disto é poupar trabalho de digitação do usuário para tornar mais rápido o uso. O coeficiente de segurança adotado S_g será 2 para o material e será acrescido de 3 para compensar os picos de torque na partida dos motores, portanto S_g usado será 5. As equações são adaptadas de (NORTON, 2013).

Definição da força tangencial F_t (N), equação E.1:

$$F_t = T / (d/2) \quad (E.1)$$

Comprimento da chaveta pelo critério de cisalhamento L_{chc} (mm), equação E.2. Será considerada a tensão de cisalhamento da chaveta como 70% do valor de sua tensão de escoamento. As dimensões das chavetas e dos canais no cubo e eixo são mostradas na figura E.1.

$$L_{chc} = (F_t * S_g) / (b * 0,7 * \sigma_{ch}) \quad (E.2)$$

Comprimento da chaveta pelo critério de esmagamento L_{che} (mm), equação E.3. Por questão de segurança o esmagamento será considerado na área que a chaveta toca o cubo dimensão $(h - t_1)$.

$$L_{che} = (F_t * S_g) / ((h - t_1) * \sigma_{ch}) \quad (E.3)$$

Comprimento da chaveta pelo critério de esmagamento do eixo L_{cheixo} (mm), equação E.4.

$$L_{cheixo} = (F_t * S_g) / (t_1 * \sigma_{eixo}) \quad (E.4)$$

Comprimento da chaveta pelo critério de esmagamento do cubo L_{chcubo} (mm), equação E.5. Por questão de segurança o esmagamento será considerado na área que a chaveta toca o cubo dimensão $(h - t_1)$.

$$L_{chcubo} = (F_t * S_g) / ((h - t_1) * \sigma_{cubo}) \quad (E.5)$$

O dimensionamento das interfaces, no caso do eixo o mesmo já está dimensionado, apenas é feita uma verificação pelo SE quando for um tubo para prevenir que o canal de chaveta não corte totalmente a parede do tubo deixando a sem apoio. Neste caso o SE sempre enviará um alerta ao usuário quando a parede do tubo for menor que $1,25 * t_1$. No dimensionamento do cubo o SE faz uma sugestão da dimensão mínima para acomodar a chaveta, e é baseado nas equações e coeficientes de (MELCONIAN, 2007). O comprimento do cubo L_{cubo} (mm) é dado pela equação E.6.

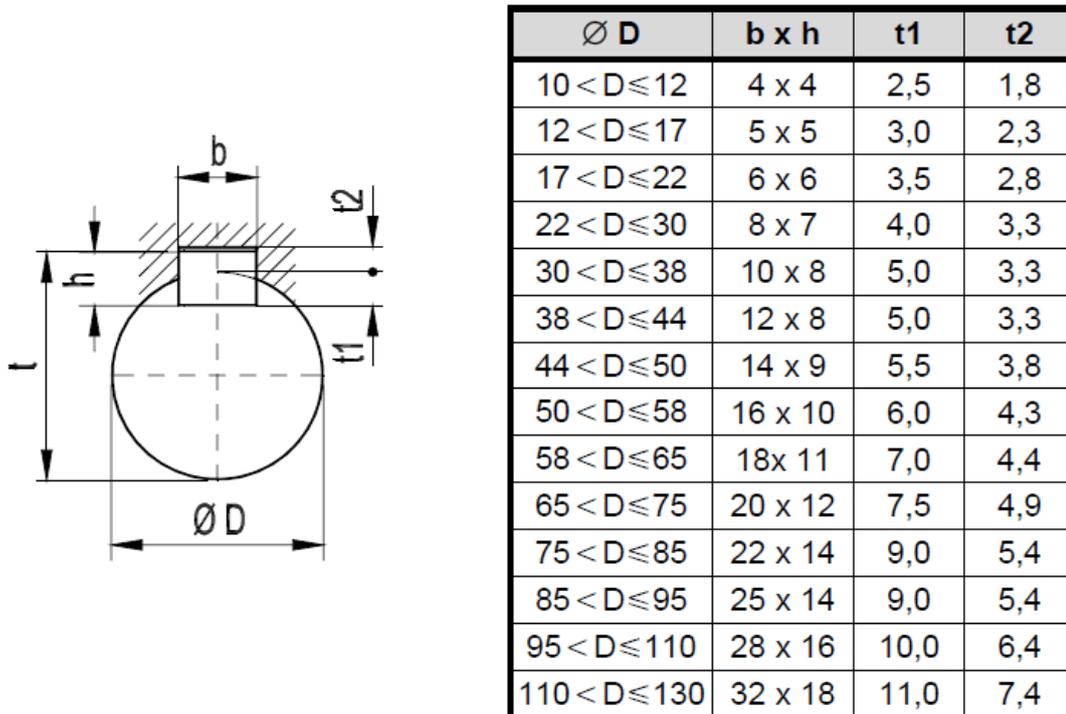
$$L_{cubo} = (2 * X) * (T * S_g * 1000)^{1/3} \quad (E.6)$$

O diâmetro do cubo D_{cubo} (mm) é dado pela equação E.7.

$$D_{\text{cubo}} = d + 2 * ((2 * Y) * (T * S_g * 1000)^{1/3}) \tag{E.7}$$

Onde: X varia de 0,42 a 0,53 para ferro fundido cinzento e de 0,21 a 0,35 para aço, e o Y varia de 0,21 a 0,30 para ferro fundido cinzento e de 0,18 a 0,26 para aço.

Figura E.1: Dimensões de chavetas conforme DIN 6885.



Fonte: DIN 6885:1968

Caso o diâmetro ou comprimento do cubo informado pelo usuário seja menor que o calculado pelo SE, este enviará um alerta que a interface do cubo não é compatível para acomodar a chaveta por ter dimensão insuficiente. Assim o usuário deverá selecionar outro componente que apresente um cubo com dimensão compatível, ou se for construir um cubo terá calculada as dimensões necessárias.

Para que o SE possa calcular o preço da chaveta a Tabela E.1 apresenta os preços em R\$/mm de comprimento para cada tamanho de chaveta, assim para se ter o preço o SE multiplica o comprimento calculado da chaveta pelo preço por mm.

Tabela E.1: Preço das chavetas em R\$/mm.

Chaveta b x h	4x4	5x5	6x6	8x7	10x8	12x8	14x9	16x10	18x11	20x12	22x14	25x14	28x16	32x18
Preço R\$/mm	0,030	0,035	0,040	0,045	0,050	0,053	0,070	0,080	0,110	0,130	0,190	0,210	0,240	0,300

Fonte: SIT 2015

Anel de fixação:

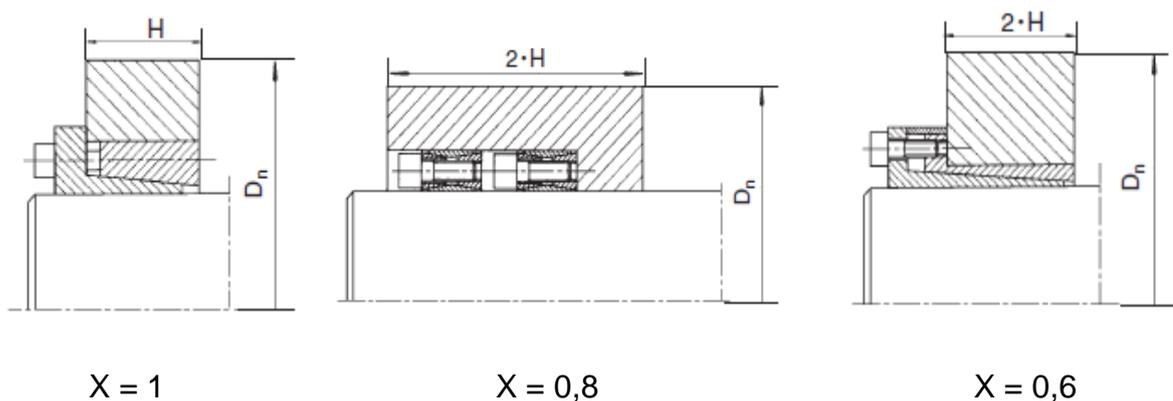
O dimensionamento e a seleção do tipo destes componentes são feitos pelo SE levando-se em conta o diâmetro do eixo d , e o torque T que deverá ser transmitido comparando com a capacidade de torque do anel encontrado nas Tabelas E.2, E.3 e E.4. As informações técnicas e de dimensionamento destes anéis são feitas baseados no catálogo técnico da (ATI, 2015). Além disto, critérios como economia de espaço na direção radial e axial entre outros que poderão ser vistos nas perguntas da matriz de decisão. Caso um anel não consiga transferir o torque da aplicação, dependendo do modelo podem ser usados mais de um.

Há duas interfaces que devem ser calculadas, o cubo e o eixo. No dimensionamento do cubo, primeiro deve ser definido o fator X , que depende do arranjo da montagem e pode ser visto na Figura E.2, e seu diâmetro é calculado pela equação E.8.

$$D_{\text{cubo}} = D * \left(\frac{(\sigma_{\text{cubo}} + (X * P_n))}{(\sigma_{\text{cubo}} - (X * P_n))} \right)^{1/2} \quad (\text{E.8})$$

Onde: P_n é a pressão específica para cada tipo e tamanho de anel exercida no cubo em daN/mm^2 obtidas das Tabelas E.2, E.3 e E.4.

Figura E.2: Fator X em função do arranjo de montagem dos anéis.



Fonte: SIT 2015

Caso o diâmetro do cubo calculado seja menor que o informado há 3 possibilidades que o SE informará: a) aumentar o diâmetro do cubo, b) usar material com tensão de escoamento maior, c) usar outro elemento de fixação cubo-eixo que não requeira um

cubo tão robusto. Com esta resposta do SE o usuário poderá fazer um novo dimensionamento e/ou seleção com outros parâmetros que possam fazer com que a interface do cubo esteja dimensionada para suportar o anel selecionado.

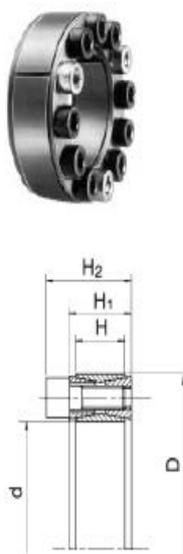
No dimensionamento do eixo há duas situações, a primeira quando o eixo é maciço. Então o SE irá comparar a pressão P_w (daN/mm²) que o anel exerce sobre o eixo obtidas das Tabelas E.2, E.3 e E.4, esta pressão não deverá ultrapassar o limite de 70% da tensão de escoamento do eixo σ_{eixo} . Se um determinado anel ultrapassar este limite o SE irá escolher um tipo de anel que exerça menor pressão, se mesmo assim a pressão do anel sobre o eixo ainda for maior esta opção de componente será descartada. O usuário também poderá optar por um material diferente que suporte nível de pressão. O mesmo raciocínio vale para um eixo na forma de tubo, porém neste caso o SE fará uma análise a mais que é comparar a espessura da parede do tubo informada com a calculada como sendo necessário para suportar a pressão do anel. Se a parede do tubo informada é menor que a calculada pelo SE este irá informar 4 opções a serem testadas: aumentar a parede do tubo para o valor padronizado igual ou maior que o calculado, usar um eixo maciço, usar material com tensão de escoamento maior, ou optar por outro elemento de fixação cubo-eixo. A espessura da parede do tubo do eixo S_{eixo} (mm) pode ser calculada pela equação E.9.

$$S_{eixo} = d/2 - [((\sigma_{eixo} * (d/2)^2) - (P_w * (d/2)^2) / (\sigma_{eixo} + P_w))]^{1/2} \quad (E.9)$$

Para que o SE possa fazer os cálculos do ponto de vista de custo são usados os preços dos anéis que estão na Tabela E.9.

Tabela E.2: Dados técnicos do anel de fixação tipo 1.

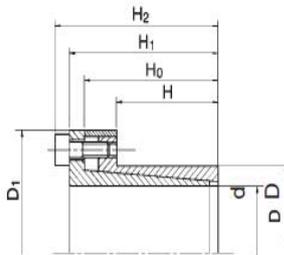
Dimensions Dimensions Abmessungen Dimensiones				Performances Pressure Leistungen Prestaciones		Pression Druck Presión Clamping screws - Vis		Clamping screws - Vis de serrage Befestigungs -Schrauben Tornillos de apriete DIN 912 - 12,9		
d x D [mm]	H ₁ [mm]	H [mm]	H ₂ [mm]	M ₁ [daNm]	P _{ax} [daN]	P _W [daN/mm ²]	P _N [daN/mm ²]	N°	size type typ tipo	M _S [daNm]
20 x 47 22 x 47 24 x 50	20 20 20	17 17 17	27,5 27,5 27,5	27 30 36	2.700 2.700 3.000	21 19,5 19,5	9 9 9,5	8 8 8	M 6 M 6 M 6	1,5 1,5 1,5
25 x 50 28 x 55 30 x 55	20 20 20	17 17 17	27,5 27,5 27,5	38 47 50	3.000 3.300 3.300	19 18,5 17,5	9,5 9,5 9,5	8 10 10	M 6 M 6 M 6	1,5 1,5 1,5
32 x 60 35 x 60 38 x 65	20 20 20	17 17 17	27,5 27,5 27,5	63 70 87	4.000 4.000 4.600	19,2 18 18,8	10,5 10,5 11	12 12 14	M 6 M 6 M 6	1,5 1,5 1,5
40 x 65 42 x 75 45 x 75	20 24 24	17 20 20	27,5 33,5 33,5	92 150 161	4.600 7.200 7.200	18 22,6 21	11 12,5 12,5	14 12 12	M 6 M 8 M 8	1,5 3,7 3,7
48 x 80 50 x 80 55 x 85	24 24 24	20 20 20	33,5 33,5 33,5	170 177 227	7.100 7.100 8.300	19,6 19 20	11,5 11,5 13	12 12 14	M 8 M 8 M 8	3,7 3,7 3,7
60 x 90 65 x 95 70 x 110	24 24 28	20 20 24	33,5 33,5 39,5	247 304 460	8.300 9.300 13.200	18 19 21	12 13 13	14 16 14	M 8 M 8 M10	3,7 3,7 7
75 x 115 80 x 120 85 x 125	28 28 28	24 24 24	39,5 39,5 39,5	490 520 630	13.100 13.100 14.800	19,5 18 19,5	12,5 12 13	14 14 16	M10 M10 M10	7 7 7
90 x 130 95 x 135 100 x 145	28 28 33	24 24 26	39,5 39,5 47	660 790 960	14.700 16.700 19.200	18 19,5 19,5	12,5 13,5 13,5	16 18 14	M10 M10 M12	7 7 12,7
110 x 155 120 x 165 130 x 180	33 33 38	26 26 34	47 47 52	1.050 1.310 1.760	19.100 21.900 27.200	18 18,5 16,5	12,5 13,5 11,5	14 16 20	M12 M12 M12	12,7 12,7 12,7
140 x 190 150 x 200 160 x 210	38 38 38	34 34 34	52 52 52	2.090 2.420 2.800	29.800 32.400 35.000	16,5 17 17	12,5 12,5 13	22 24 26	M12 M12 M12	12,7 12,7 12,7
170 x 225 180 x 235 190 x 250	44 44 52	38 38 46	60 60 68	3.280 3.780 4.650	38.600 42.000 49.000	16 16,5 15	12 12,5 11,5	22 24 28	M14 M14 M14	19,5 19,5 19,5
200 x 260 220 x 285 240 x 305	52 56 56	46 50 50	68 74 74	5.250 6.800 8.550	52.500 62.000 71.500	15 15 16	11,5 11,5 12,5	30 26 30	M14 M16 M16	19,5 30 30
260 x 325 280 x 355 300 x 375	56 66 66	50 60 60	74 86,5 86,5	10.400 12.800 15.300	80.000 91.500 102.000	16,5 14,5 15	13 11,5 12	34 32 36	M16 M18 M18	30 41 41
320 x 405 340 x 425 360 x 455	78 78 90	72 72 84	100,5 100,5 116	21.000 22.400 29.400	131.000 131.000 163.000	15 14,5 14,5	12 11,5 11,5	36 36 36	M20 M20 M22	59 59 79
380 x 475 400 x 495 420 x 515	90 90 90	84 84 84	116 116 116	30.800 32.200 37.000	162.000 161.000 178.000	13,5 13 13,5	11 10,5 11	36 36 40	M22 M22 M22	79 79 79
440 x 545 460 x 565 480 x 585	102 102 102	96 96 96	130 130 130	45.000 46.500 50.500	205.000 203.000 215.000	13 12,5 12,5	10,5 10 10	40 40 42	M24 M24 M24	100 100 100
500 x 605 520 x 630 540 x 650	102 102 102	96 96 96	130 130 130	55.300 59.200 61.800	220.000 230.000 232.000	12,5 12,5 12	10 10 10	44 45 45	M24 M24 M24	100 100 100
560 x 670 580 x 690 600 x 710	102 102 102	96 96 96	130 130 130	67.000 72.700 77.000	243.000 252.000 256.500	12 12 12	10 10 10	48 50 50	M24 M24 M24	100 100 100
620 x 730 640 x 750 660 x 770	102 102 102	96 96 96	130 130 130	81.800 86.000 91.900	264.700 269.800 279.000	12 11,5 12	10 10 10	52 54 56	M24 M24 M24	100 100 100
680 x 790 700 x 810 720 x 830	102 102 102	96 96 96	130 130 130	95.500 101.800 106.000	282.000 294.500 296.500	11,5 11,5 11,5	10 10 10	56 60 60	M24 M24 M24	100 100 100
740 x 850 760 x 870 780 x 890	102 102 102	96 96 96	130 130 130	112.800 120.000 123.500	306.500 317.000 320.500	11,5 11,5 11,5	10 10 10	62 64 65	M24 M24 M24	100 100 100
800 x 910 820 x 930 840 x 950	102 102 102	96 96 96	130 130 130	128.700 136.000 143.500	326.000 333.000 344.500	11,5 11,5 11,5	10 10 10	66 68 70	M24 M24 M24	100 100 100
860 x 970 880 x 990 900 x 1010	102 102 102	96 96 96	130 130 130	151.000 157.800 163.500	352.500 361.000 366.500	11,5 11,5 11,5	10 10 10	72 74 75	M24 M24 M24	100 100 100



Fonte: ATI 2015

Tabela E.3: Dados técnicos do anel de fixação tipo 3.

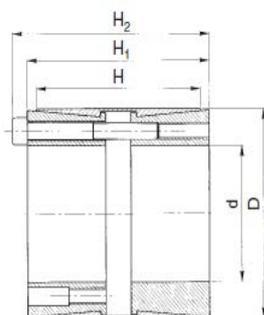
Dimensions Dimensions Abmessungen Dimensiones						Performances Performances Leistungen Prestaciones		Pressure Pression Druck Presión		Clamping screws /Vis de serrage Befestigungs-Schrauben Tornillos de apriete DIN 912 - 12.9		
d x D [mm]	H [mm]	H ₀ [mm]	H ₁ [mm]	H ₂ [mm]	D ₁ [mm]	M _t [daNm]	P _{ax} [daN]	P _w [daN/mm ²]	P _N [daN/mm ²]	Nº	size type Typ tipo	M ₃ [daNm]
6 x 14	10	18,5	21	24	25	1,3	450	19	8	3	M 3	0,20
7 x 15	12	22	25	29	27	2,4	650	23	11	3	M 4	0,49
8 x 15	12	22	25	29	27	2,5	665	21	11	3	M 4	0,49
9 x 16	14	23	26	30	28	4,5	998	21	12	4	M 4	0,49
10 x 16	14	23	26	30	28	4,9	998	19	12	4	M 4	0,49
11 x 18	14	23	26	30	32	5,4	998	17	10,5	4	M 4	0,49
12 x 18	14	23	26	30	32	6	998	15,5	10,5	4	M 4	0,49
13 x 23	14	23	26	30	38	6,3	998	14,5	8,5	4	M 4	0,49
14 x 23	14	23	26	30	38	7	998	13,5	8,5	4	M 4	0,49
15 x 24	16	29	36	42	45	12	1.710	18,5	12	3	M 6	1,7
16 x 24	16	29	36	42	45	14	1.710	18	12	3	M 6	1,7
17 x 26	18	31	38	44	47	18	2.200	19	12,5	4	M 6	1,7
18 x 26	18	31	38	44	47	20	2.200	18	12,5	4	M 6	1,7
19 x 27	18	31	38	44	49	21	2.200	17	12	4	M 6	1,7
20 x 28	18	31	38	44	50	22	2.200	16	11,5	4	M 6	1,7
22 x 32	25	38	45	51	54	25	2.200	11,5	8	4	M 6	1,7
24 x 34	25	38	45	51	56	27	2.200	10,5	7,5	4	M 6	1,7
25 x 34	25	38	45	51	56	28	2.200	10	7,5	4	M 6	1,7
28 x 39	25	38	45	51	61	46,5	3.300	13,5	10	6	M 6	1,7
30 x 41	25	38	45	51	62	51	3.300	12,5	9	6	M 6	1,7
32 x 43	25	38	45	51	65	54	3.300	12	9	6	M 6	1,7
35 x 47	32	45	52	58	69	79	4.500	10,5	8	8	M 6	1,7
38 x 50	32	45	52	58	72	86	4.500	10	7,5	8	M 6	1,7
40 x 53	32	45	52	58	75	90	4.500	9,5	7	8	M 6	1,7
42 x 55	32	45	52	58	78	95	4.500	9	7	8	M 6	1,7
45 x 59	45	62	70	78	86	189	8.400	11	8,5	8	M 8	4,1
48 x 62	45	62	70	78	87	201	8.400	10,5	8	8	M 8	4,1
50 x 65	45	62	70	78	92	210	8.400	10	7,5	8	M 8	4,1
55 x 71	55	72	80	88	98	260	9.400	8,5	6,5	9	M 8	4,1
60 x 77	55	72	80	88	104	284	9.400	7,5	6	9	M 8	4,1
65 x 84	55	72	80	88	111	307	9.400	7	5,5	9	M 8	4,1
70 x 90	65	86	96	106	119	525	15.000	9	7	9	M10	8,3
75 x 95	65	86	96	106	126	560	15.000	8	6,5	9	M10	8,3
80 x 100	65	86	96	106	131	802	20.000	10	8	12	M10	8,3
85 x 106	65	86	96	106	137	850	20.000	9,5	7,5	12	M10	8,3
90 x 112	65	86	96	106	144	900	20.000	9	7,5	12	M10	8,3
95 x 120	65	86	96	106	149	1.100	23.000	10	8	14	M10	8,3
100 x 125	65	86	96	106	154	1.500	30.000	12	9,5	18	M10	8,3
110 x 140	90	114	128	140	180	1.600	29.000	8	6,5	12	M12	14,5
120 x 155	90	114	128	140	198	1.750	29.000	7	5,5	12	M12	14,5
130 x 165	90	114	128	140	208	2.500	38.400	9	7	16	M12	14,5



Fonte: ATI 2015

Tabela E.4: Dados técnicos do anel de fixação tipo 3.

				SIT LOCK 4						
Dimensions Dimensions Abmessungen Dimensiones				Performances Performances Leistungen Prestaciones		Pressure Pression Druck Presión		Clamping screws Vis de serrage Befestigungs-Schrauben Tomillos de apriete DIN 912 - 12.9		
d x D [mm]	H [mm]	H ₁ [mm]	H ₂ [mm]	M _t [da Nm]	P _{ax} [da N]	P _w [da N/mm ²]	P _N [da N/mm ²]	N°	size type Typ tipo	M _S [da Nm]
25 x 50	39	45	51	95	7.600	24,5	12,2	8	M 6	1,7
28 x 55	39	45	51	107	7.600	21,9	11,1	8	M 6	1,7
30 x 55	39	45	51	115	7.600	20,4	11,1	8	M 6	1,7
35 x 60	39	45	51	134	7.600	17,5	10,2	8	M 6	1,7
38 x 65	39	45	51	145	7.600	16,1	9,4	8	M 6	1,7
40 x 65	39	45	51	153	7.600	15,3	9,4	8	M 6	1,7
42 x 75	56	64	72	297	14.100	18,8	10,5	8	M 8	4,1
45 x 75	56	64	72	315	14.100	17,5	10,5	9	M 8	4,1
48 x 80	56	64	72	400	16.600	16,4	9,8	9	M 8	4,1
50 x 80	56	64	72	415	16.600	15,2	9,8	9	M 8	4,1
55 x 85	56	64	72	455	16.600	14,3	9,3	9	M 8	4,1
60 x 90	56	64	72	620	20.700	16,4	10,9	11	M 8	4,1
65 x 95	56	64	72	675	20.700	15,2	10,4	11	M 8	4,1
70 x 110	70	78	88	1.155	33.000	17,9	11,4	11	M10	8,3
75 x 115	70	78	88	1.235	33.000	16,7	10,9	11	M10	8,3
80 x 120	70	78	88	1.580	39.600	18,8	12,5	12	M10	8,3
85 x 125	70	78	88	1.680	39.600	17,7	12,0	12	M10	8,3
90 x 130	70	78	88	1.780	39.600	16,7	11,5	13	M10	8,3
95 x 135	70	78	88	1.800	39.600	15,8	11,1	13	M10	8,3
100 x 145	90	100	112	2.880	57.600	17,0	11,7	12	M12	14,5
110 x 155	90	100	112	3.170	57.600	15,5	11,0	13	M12	14,5
120 x 165	90	100	112	4.030	67.300	16,5	12,0	15	M12	14,5
130 x 180	104	116	130	5.140	79.100	15,5	11,2	13	M14	23
140 x 190	104	116	130	6.460	92.300	16,8	12,4	15	M14	23
150 x 200	104	116	130	7.910	105.500	17,9	13,5	16	M14	23
160 x 210	104	116	130	8.440	105.500	16,8	12,8	17	M14	23
170 x 225	134	146	162	10.900	128.300	14,9	11,3	15	M16	35,5
180 x 235	134	146	162	13.200	146.600	16,1	12,4	16	M16	35,5
190 x 250	134	146	162	13.900	146.600	15,3	11,6	17	M16	35,5
200 x 260	134	146	162	14.650	146.600	14,5	11,2	17	M16	35,5
220 x 285	134	146	162	20.150	183.300	16,5	12,7	20	M16	35,5
240 x 305	134	146	162	24.200	201.700	16,6	13,1	22	M16	35,5
260 x 325	134	146	162	26.200	201.700	15,4	12,3	22	M16	35,5
280 x 355	165	177	197	40.000	286.200	16,4	13,0	20	M20	69,0
300 x 375	165	177	197	47.200	314.800	16,9	13,5	22	M20	69,0
320 x 405	165	177	197	50.350	314.800	15,8	12,5	22	M20	69,0
340 x 425	165	177	197	58.350	343.400	16,2	13,0	24	M20	69,0
360 x 455	190	202	224	70.500	391.800	15,2	12,0	22	M22	93,0
380 x 475	190	202	224	88.000	463.100	17,0	13,6	26	M22	93,0
400 x 495	190	202	224	92.600	463.100	16,2	13,1	26	M22	93,0



Fonte: ATI 2015

Buchas QD e TL:

O dimensionamento do tamanho da bucha é feito pelo SE levando se em conta o diâmetro do eixo d , e o torque T que deverá ser transmitido comparando com a capacidade informada na tabela E.6 para bucha QD e da tabela E.8. para bucha TL.

O dimensionamento do diâmetro do cubo é feito pelo SE que usa os valores da tabela E.5 para as buchas QD e da tabela E.7 para as buchas TL em função do material do cubo e o tamanho da bucha.

Caso o diâmetro do cubo indicado seja menor que o informado pelo usuário há 3 possibilidades que o SE informará: a) aumentar o diâmetro do cubo, b) usar material com tensão de escoamento maior, c) usar outro elemento de fixação cubo-eixo que requeira um cubo de diâmetro menor. A mesma lógica é usada para a largura do cubo. Com esta resposta do SE o usuário poderá fazer um novo dimensionamento e/ou seleção com outros parâmetros que possam fazer com que a interface do cubo esteja dimensionada para suportar a bucha selecionada.

O dimensionamento das interfaces, no caso do eixo, o mesmo já está dimensionado, apenas é feita uma verificação pelo SE quando for um tubo para prevenir que o canal de chaveta não corte totalmente a parede do tubo deixando a sem apoio, pois estas buchas usam chavetas. Neste caso o SE sempre enviará um alerta ao usuário quando a parede do tubo for menor que $1,25 * t_1$.

Para que o SE possa fazer os cálculos do ponto de vista de custo são usados os preços das buchas QD e TL que estão na tabela E.9.

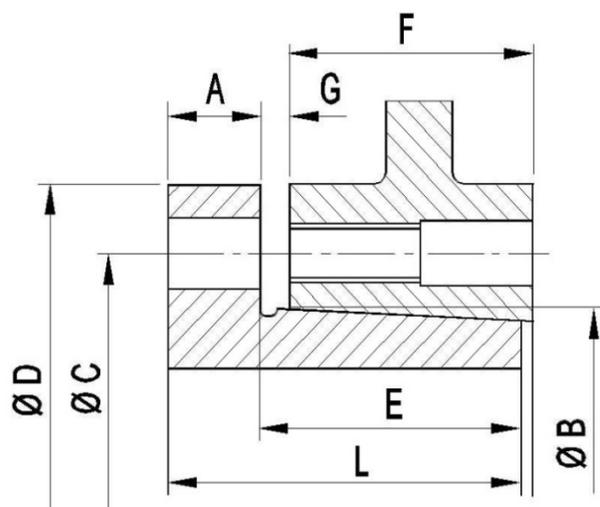
Tabela E.5: Diâmetro mínimo do cubo para buchas QD em função do material do cubo.

Bucha QD	Diâmetro mínimo do cubo para os materiais			
	Ferro cinzento 180 N/mm ²	Ferro cinzento 250 N/mm ²	Aço 420 N/mm ²	Aço 600 N/mm ²
JA	70	65	57	53
SH	90	84	76	72
SDS	100	94	89	85
SD	100	94	89	85
SK	125	119	111	105
SF	145	138	127	123
E	185	174	160	157
F	200	193	180	175
J	220	213	198	193
M	270	263	242	237
N	300	287	268	263
P	350	343	330	320
W	445	430	395	390
S	525	515	495	480

Fonte: Martin, 2015

Tabela E.6: Dados técnicos das buchas QD.

Bucha	Ø Bucha Tol. B	Compr Tol -0 G	ØFlange máx D	Espessura Flange A	Comp s/ flan ± 0,3 E	Comp Total mín. L	Ø Centro Parafuso C	Compr do Cubo F	Parafusos Classe 8.8	Torque no Parafuso N*m	Torque da Bucha N*m	Ø Eixo Ch DIN 6885 Min. - Max.
JA	64,0000 ± 0,025	3,1750 + 1,0	51,00	8,00	17,40	25,40	42,00	14,50	3 x 3/16"x1"UNC	6	113	11-22
SH	47,5234 ± 0,025	3,1750 + 1,0	68,50	9,50	22,60	32,10	57,10	20,50	3 x 1/4"x1"UNC	10	396	11-35
SDS	55,5625 ± 0,025	3,1750 + 1,0	81,00	11,00	22,60	33,60	68,30	19,00	3 x 1/4"x1 1/4"UNC	10	565	14-42
SD	55,5625 ± 0,025	3,1750 + 1,0	81,00	11,00	35,00	46,00	68,30	32,00	3 x 1/4"x2"UNC	10	565	14-42
SK	71,4375 ± 0,025	3,1750 + 1,0	99,00	12,50	35,00	47,50	84,10	32,00	3 x 5/16"x2"UNC	20	791	14-55
SF	79,3750 ± 0,050	3,1750 + 1,0	118,00	12,50	38,00	50,50	98,50	32,00	3 x 3/8"x2"UNC	40	1243	24-60
E	97,3836 ± 0,050	3,1750 + 1,0	153,00	19,00	47,50	66,50	127,00	41,50	3 x 1/2"x2 3/4"UNC	80	2260	28-75
F	112,7125 ± 0,050	4,7625 + 1,5	169,00	21,00	71,50	92,50	142,90	63,50	3 x 9/16"x3 1/2"UNC	100	3391	38-90
J	130,7694 ± 0,050	4,7625 + 1,5	185,00	25,00	89,00	114,00	158,80	81,00	3 x 5/8"x4 1/2"UNC	180	5086	48-100
M	165,1000 ± 0,050	4,7625 + 1,5	232,00	32,00	139,50	171,50	200,00	132,00	4 x 3/4"x7"UNC	300	9607	55-130
N	177,8000 ± 0,050	6,3500 + 2,0	255,00	38,00	168,50	206,50	216,00	159,00	4 x 7/8"x8"UNC	400	16953	65-140
P	209,5500 ± 0,050	6,3500 + 2,0	299,00	44,00	194,00	238,00	254,00	184,00	4 x 1"x9 1/2"UNC	600	28256	75-160
W	265,1000 ± 0,050	6,3500 + 2,0	381,00	51,00	238,00	289,00	324,00	229,00	4 x 1 1/8"x11"UNC	800	42384	90-200
S	307,9750 ± 0,050	9,5250 + 2,0	451,00	82,50	317,50	400,00	381,00	305,00	5x1 1/4"x15 1/2"UNC	1000	70639	100-240



Fonte: Martin, 2015

Tabela E.7: Diâmetro mínimo do cubo para buchas TL em função do material do cubo.

Bucha TL	Diâmetro mínimo do cubo para os materiais			
	Ferro cinzento 180 N/mm ²	Ferro cinzento 250 N/mm ²	Aço 420 N/mm ²	Aço 600 N/mm ²
1008	62	54	51	47
1108	64	57	54	50
1210	104	86	78	69
1215	95	76	71	65
1310	110	90	83	75
1610	109	92	85	78
1615	90	81	77	73
2012	121	106	99	92
2017	110	96	90	84
2517	130	119	113	108
2525	120	112	105	102
3020	160	146	140	132
3030	144	136	132	127
3525	211	191	178	167
3535	191	176	168	160
4030	224	207	197	186
4040	209	195	188	180
4535	223	212	205	198
4545	215	205	200	194
5040	240	229	223	216
5050	233	223	219	213

Fonte: Martin, 2015

Tabela E.8: Dados técnicos das buchas TL.

Bucha	Ø Ref. Bucha Tolerância	Comprimento cubo/bucha	Ø Centro Parafusos de fixação	Parafusos BSW Classe 8.8	Ø Eixo Máx. Ch DIN 6885 GG25/1020	Capacidade de torque da Bucha Nm	Torque nos parafusos Nm
1008	35,20 ± 0,025	22,2	33,7	2 x 1/4"x1/2" SC	11-19,9 20-22	140	5,80
1108	38,38 ± 0,025	22,2	36,9	2 x 1/4"x1/2" SC	11-21,9 22-25	150	5,80
1210	47,63 ± 0,025	25,4	44,5	2 x 3/8"x5/8" SC	11-29,9 30-32	410	20,0
1215	47,63 ± 0,025	38,1	44,5	2 x 3/8"x5/8" SC	11-27,9 28-30	410	20,0
1310	50,80 ± 0,025	25,4	47,6	2 x 3/8"x5/8" SC	11-31,9 32-35	450	20,0
1610	57,15 ± 0,025	25,4	54,0	2 x 3/8"x5/8" SC	14-37,9 38-42	500	20,0
1615	57,15 ± 0,025	38,1	54,0	2 x 3/8"x5/8" SC	14-37,9 38-40	500	20,0
2012	69,85 ± 0,025	31,8	66,7	2 x 7/16"x7/8" SC	19-47,9 48-50	820	31,0
2017	69,85 ± 0,025	44,5	66,7	2 x 7/16"x7/8" SC	19-45 45.1-48	820	31,0
2517	85,73 ± 0,050	44,5	82,6	2 x 1/2"x1" SC	19-59,9 60-65	1340	50,0
2525	85,73 ± 0,050	63,5	82,6	2 x 1/2"x1" SC	19-55 55.1-60	1340	50,0
3020	107,95 ± 0,050	50,8	101,6	2 x 5/8"x1 1/4" SC	28-69.9 70-75	2770	94,0
3030	107,95 ± 0,050	76,2	101,6	2 x 5/8"x1 1/4" SC	28-69.9 70-75	2770	94,0
3525	127,00 ± 0,050	63,5	122,7 G=39	3 x 1/2"x1 1/2" CC	38-84.9 85-90	5160	117,0
3535	127,00 ± 0,050	88,9	122,7 G=39	3 x 1/2"x1 1/2" CC	38-84.9 85-90	5160	117,0
4030	146,05 ± 0,050	76,2	140,7 G=40	3 x 5/8"x1 3/4" CC	42-94.9 95-100	8910	175,0
4040	146,05 ± 0,050	101,6	140,7 G=40	3 x 5/8"x1 3/4" CC	42-94.9 95-100	8910	175,0
4535	161,93 ± 0,050	88,9	155,7 G=40	3 x 3/4"x2" CC	55-104.9 105-110	12670	198,0
4545	161,93 ± 0,050	114,3	155,7 G=40	3 x 3/4"x2" CC	55-104.9 105-110	12670	198,0
5040	177,80 ± 0,050	101,6	170,7 G=37	3 x 7/8"x2 1/4" CC	70-114.9 115-125	14520	280,0

Fonte: Martin, 2015

Tabela E.9: Lista de preço dos anéis de fixação tipo 1, 3, 4, buchas TL e QD.

Anel tipo 1		Anel tipo 3		Anel tipo 4		Bucha TL		Bucha QD	
Tamanho	Preço	Tamanho	Preço	Tamanho	Preço	Tamanho	Preço	Tamanho	Preço
		12 x 18	73,81			1008	28,53	JÁ	42,68
		14 x 23	75,02			1108	30,76	SH	45,20
		15 x 24	76,23			1210	44,73	SDS	49,49
		16 x 24	77,44			1215	47,30	SD	64,50
19 x 47	53,60	19 x 27	81,07			1310	48,50	SK	85,13
20 x 47	53,60	20 x 28	82,28			1610	50,31	SF	91,52
22 x 47	53,60	22 x 32	85,02			1615	58,73	E	169,45
24 x 50	56,12	24 x 34	89,39			2012	70,31	F	219,75
25 x 50	56,12	25 x 34	91,96	25 x 50	133,10	2017	82,37	J	289,27
28 x 55	58,64	28 x 39	93,54	28 x 55	138,38	2517	144,30	M	589,65
30 x 55	58,64	30 x 41	93,62	30 x 55	138,38	2525	160,89	N	1267,37
32 x 60	60,47	32 x 43	110,02			3020	193,69	P	1958,22
35 x 60	65,47	35 x 47	110,35	35 x 60	148,58	3030	285,91	W	2619,85
38 x 65	66,70	38 x 50	119,81	38 x 65	164,46	3525	302,45		
40 x 65	69,20	40 x 53	123,33	40 x 65	187,55	3535	418,70		
42 x 75	75,45	42 x 55	138,92	42 x 75	224,54	4030	585,29		
45 x 75	75,45	45 x 59	156,81	45 x 75	224,54	4040	612,39		
48 x 80	75,45	48 x 62	167,30	48 x 80	241,98	4535	797,42		
50 x 80	87,88	50 x 65	172,90	50 x 80	253,36	4545	833,15		
55 x 85	87,88	55 x 71	207,39	55 x 85	276,20	5040	1028,87		
60 x 90	91,62	60 x 77	233,51	60 x 90	292,73	5050	1113,70		
65 x 95	93,52	65 x 84	293,17	65 x 95	321,60				
70 x 110	114,95	70 x 90	325,99	70 x 110	400,39				
75 x 115	135,88	75 x 95	370,77	75 x 115	429,17				
80 x 120	149,59	80 x 100	445,28	80 x 120	451,24				
85 x 125	153,98	85 x 106	471,68	85 x 125	476,91				
90 x 130	170,78	90 x 112	502,80	90 x 130	497,38				
95 x 135	175,16	95 x 120	640,88	95 x 135	555,28				
100 x 145	182,66			100 x 145	631,43				
110 x 155	213,50			110 x 155	725,04				
120 x 165	231,96			120 x 165	773,63				
130 x 180	244,98			130 x 180	973,00				
140 x 190	391,46			140 x 190	1266,94				
150 x 200	431,81			150 x 200	1373,09				
160 x 210	537,96			160 x 210	1470,39				
170 x 225	585,96			170 x 225	1739,15				
180 x 235	682,56			180 x 235	1875,92				
190 x 250	842,06								
200 x 260	921,32			200 x 260	2322,28				

Fonte: ATI 2015

ANEXO F: MATRIZES DE DECISÃO

Neste anexo, são mostradas as matrizes de decisão dos seguintes grupos funcionais: eixos, fixação cubo-eixo, motores, transmissões e mancais, além disto as tabelas das faixas de aplicação dos elementos de transmissão em função da potência e velocidade.

Tabela F.1: Matriz 1 de decisão, mancalização.

Requisito de aplicação	Rolamento rígido de esferas RO	Mancal Rolamento rígido de esferas Y + Bucha H	Rolamento de esferas contato angular	Rolamento de esferas contato angular combinado	Rolamento autocompensador de esferas	Rolamento autocompensador de esferas + Bucha H	Rolamento autocompensador de esferas + Bucha AH
Possui carga radial?	8	8	8	8	6	6	6
Possui carga axial em uma direção?	5	5	8	8	3	3	3
Possui carga axial em ambas as direções?	5	5	0	8	3	3	3
Possui carga combinada?	5	5	8	8	2	2	2
Possui carga de choque?	0	0	0	3	0	0	0
Possui alta velocidade giro?	10	8	10	8	8	8	8
É necessário precisão de giro?	5	4	8	10	2	6	6
É necessário elevada rigidez?	4	4	4	8	2	2	2
É necessário baixo torque?	10	6	8	5	10	10	10
É necessário funcionamento silencioso?	10	6	8	10	3	3	3
É necessário compensação de desalinhamento?	0	10	0	0	10	10	10
Deve haver tolerância ao desalinhamento?	3	8	3	3	10	10	10
É necessário compensação linear no rolamento?	0	0	0	0	0	0	0
É possível compensação linear por ajuste livre?	5	5	0	5	5	5	5
Deve atuar como lado livre?	5	5	0	0	5	5	5
Deve atuar como lado fixo?	8	8	10	10	5	5	5
É necessário vedação?	10	10	0	0	5	5	5
É necessário que o rolamento seja separável?	0	0	0	0	0	0	0
É necessário furo cônico?	0	8	0	0	0	10	10
É necessário ajuste de folga?	0	0	10	10	0	5	5
Deve funcionar sem lubrificação?	0	0	0	0	0	0	0
Deve gerar pouco calor?	10	7	8	8	10	10	10
É necessário elevado amortecimento?	0	0	0	0	0	0	0
Deve manter a forma do eixo?	10	10	10	10	10	10	10
Deve ser compacto na direção axial?	5	0	5	5	0	0	0
Deve ser compacto na direção radial?	0	0	0	0	0	0	0
É imperativo o baixo custo?	10	8	7	7	6	6	6
É imperativo a disponibilidade/Logística?	10	10	7	7	7	7	7
Deve dispensar usinagem/precisão no eixo?	0	10	0	0	0	10	10
Deve dispensar usinagem fixação axial no eixo?	0	10	0	0	0	10	0
Deve dispensar rugosidade controlada no eixo?	0	5	0	0	0	5	5
Pequena variação na folga radial do eixo?	10	10	10	10	10	10	10
Deve propiciar montagem/desmontagem rápida?	0	10	0	0	0	10	10
É preciso dispensar fabricação do alojamento?	0	10	0	0	0	0	0
Deve ser tolerante à fadiga?	5	5	7	7	4	4	4

Fonte: Própria

Tabela F.2: Matriz 2 de decisão, mancalização.

Requisito de aplicação	Mancal + Bucha H Rolamento autocompensador de estafas	Rolamento de rolo cilindrico	Rolamento de rolo cônico	Rolamento de rolo cônico combinado	Rolamento autocompensador de rolos	Rolamento autocompensador de rolos + Bucha H	Rolamento autocompensador de rolos + Bucha AH
Possui carga radial?	6	10	10	10	10	10	10
Possui carga axial em uma direção?	3	0	10	10	6	6	6
Possui carga axial em ambas as direções?	3	0	0	10	6	6	6
Possui carga combinada?	2	0	8	10	6	6	6
Possui carga de choque?	0	6	5	7	8	8	8
Possui alta velocidade giro?	8	10	6	6	6	6	6
É necessário precisão de giro?	6	8	8	8	2	6	6
É necessário elevada rigidez?	2	7	6	10	8	8	8
É necessário baixo torque?	10	7	5	5	5	5	5
É necessário funcionamento silencioso?	3	6	3	3	3	3	3
É necessário compensação de desalinhamento?	10	0	0	0	10	10	10
Deve haver tolerância ao desalinhamento?	10	3	2	0	10	10	10
É necessário compensação linear no rolamento?	0	10	0	0	0	0	0
É possível compensação linear por ajuste livre?	5	0	0	0	6	6	6
Deve atuar como lado livre?	5	10	0	0	6	6	6
Deve atuar como lado fixo?	5	0	10	10	9	9	9
É necessário vedação?	5	0	0	0	5	5	5
É necessário que o rolamento seja separável?	0	10	10	10	0	0	0
É necessário furo cônico?	10	5	0	0	0	10	10
É necessário ajuste de folga?	5	0	10	10	0	5	5
Deve funcionar sem lubrificação?	0	0	0	0	0	0	0
Deve gerar pouco calor?	10	9	7	7	7	7	7
É necessário elevado amortecimento?	0	0	0	0	0	0	0
Deve manter a forma do eixo?	10	10	10	10	10	10	10
Deve ser compacto na direção axial?	0	5	5	0	3	0	0
Deve ser compacto na direção radial?	0	0	0	0	0	0	0
É imperativo o baixo custo?	6	5	6	6	5	5	5
É imperativo a disponibilidade/Logística?	7	6	8	8	6	6	6
Deve dispensar usinagem/precisão no eixo?	10	0	0	0	0	10	10
Deve dispensar usinagem fixação axial no eixo?	10	0	0	0	0	10	0
Deve dispensar rugosidade controlada no eixo?	5	0	0	0	0	5	5
Pequena variação na folga radial do eixo?	10	10	10	10	10	10	10
Deve propiciar montagem/desmontagem rápida?	10	0	0	0	0	10	10
É preciso dispensar fabricação do alojamento?	10	0	0	0	0	0	0
Deve ser tolerante à fadiga?	4	8	8	8	9	9	9

Fonte: Própria

Tabela F.3: Matriz 3 de decisão, mancalização.

Requisito de aplicação	Mancal + Bucha H Rolamento autocompensador de rolos	Rolamento axial de esferas	Rolamento axial de esferas de dupla carreira	Buchas radiais	Buchas axiais	Buchas radial e axial
Possui carga radial?	10	0	0	5	0	5
Possui carga axial em uma direção?	6	8	8	0	5	5
Possui carga axial em ambas as direções?	6	0	8	0	0	0
Possui carga combinada?	6	0	0	0	0	5
Possui carga de choque?	8	0	0	10	10	10
Possui alta velocidade giro?	6	5	5	4	4	4
É necessário precisão de giro?	6	8	2	0	0	0
É necessário elevada rigidez?	8	5	5	0	0	0
É necessário baixo torque?	5	6	4	0	0	0
É necessário funcionamento silencioso?	3	3	0	10	10	10
É necessário compensação de desalinhamento?	10	0	0	0	0	0
Deve haver tolerância ao desalinhamento?	10	2	2	4	4	4
É necessário compensação linear no rolamento?	0	0	0	10	0	10
É possível compensação linear por ajuste livre?	6	0	0	0	0	0
Deve atuar como lado livre?	6	0	0	10	0	10
Deve atuar como lado fixo?	9	0	10	0	0	0
É necessário vedação?	5	0	0	0	0	0
É necessário que o rolamento seja separável?	0	10	10	0	0	0
É necessário furo cônico?	10	0	0	0	0	0
É necessário ajuste de folga?	5	0	0	0	0	0
Deve funcionar sem lubrificação?	0	0	0	10	10	10
Deve gerar pouco calor?	7	9	7	0	0	0
É necessário elevado amortecimento?	0	0	0	10	10	10
Deve manter a forma do eixo?	10	10	10	0	0	0
Deve ser compacto na direção axial?	0	2	0	0	10	0
Deve ser compacto na direção radial?	0	0	0	10	0	0
É imperativo o baixo custo?	5	5	4	10	10	10
É imperativo a disponibilidade/Logística?	6	5	4	5	5	5
Deve dispensar usinagem/precisão no eixo?	10	10	10	0	0	0
Deve dispensar usinagem fixação axial no eixo?	10	0	0	10	0	0
Deve dispensar rugosidade controlada no eixo?	5	10	10	0	0	0
Pequena variação na folga radial do eixo?	10	10	10	0	0	0
Deve propiciar montagem/desmontagem rápida?	10	10	10	10	10	10
É preciso dispensar fabricação do alojamento?	10	0	0	0	0	0
Deve ser tolerante à fadiga?	9	6	6	9	9	9

Fonte: Própria

Tabela F.4: Matriz de decisão, transmissão.

Requisito de aplicação	Corrente	Correia sincronizada	Correia sincronizada	Correia em V	Correia micro V	Engrenagem Helicoidal	Engrenagem Dente Reto	Coroa e Sem Fim
	CO	PU	NE	CV	MV	EH	ER	CS
Rotação da transmissão (rpm)?								
Potência da transmissão (Cv)?								
É necessário sincronização?	10	10	10	0	0	10	10	10
É necessário ausência de lubrificação?	0	10	10	10	10	0	0	0
É necessário baixo peso e inércia?	2	8	7	3	6	10	8	8
É necessário que não haja alongação?	0	10	9	7	7	10	10	10
É necessária transmissão compacta?	8	8	6	4	5	10	10	9
É necessário grandes relações de transmissão?	5	5	5	5	7	5	5	10
É necessário que os eixos estejam em planos diferentes?	0	0	0	0	0	10	10	10
É necessário grandes distancias entre centros?	8	6	8	10	5	0	0	0
É necessário acionar vários eixos próximos uns dos outros?	3	3	3	2	4	10	10	0
É necessário acionar vários eixos distantes uns dos outros?	10	7	8	10	7	0	0	0
É necessário acionar vários eixos que giram em sentidos opostos?	10	7	7	5	3	10	10	0
É necessário suportar alta temperatura e produtos químicos?	6	5	3	3	3	10	10	8
É necessário flexibilidade de layout?	10	7	7	5	5	3	2	3
É imperativo facilidade logística e disponibilidade?	10	1	7	10	3	6	7	5
É imperativo que a manutenção seja simples e rápida?	8	9	9	10	10	3	3	3
É necessário baixa frequência de manutenção?	3	9	8	7	7	10	9	5
É necessário a função de absorção de choques?	5	6	7	10	10	0	0	1
É necessário funcionamento silencioso e com baixa vibração?	5	6	6	10	10	4	1	4
É necessário baixo carregamento nos mancais?	10	10	10	4	4	10	10	8
É imperativo o baixo custo?	10	4	6	8	7	4	6	8
É necessário alta confiabilidade?	8	6	6	4	4	10	9	6
É necessário alta eficiência?	10	10	10	6	6	10	10	3
É necessário alta rigidez?	2	7	5	2	2	10	7	7

Fonte: Própria

Gráfico F.1: Gráfico potência x rotação para correntes de transmissão.

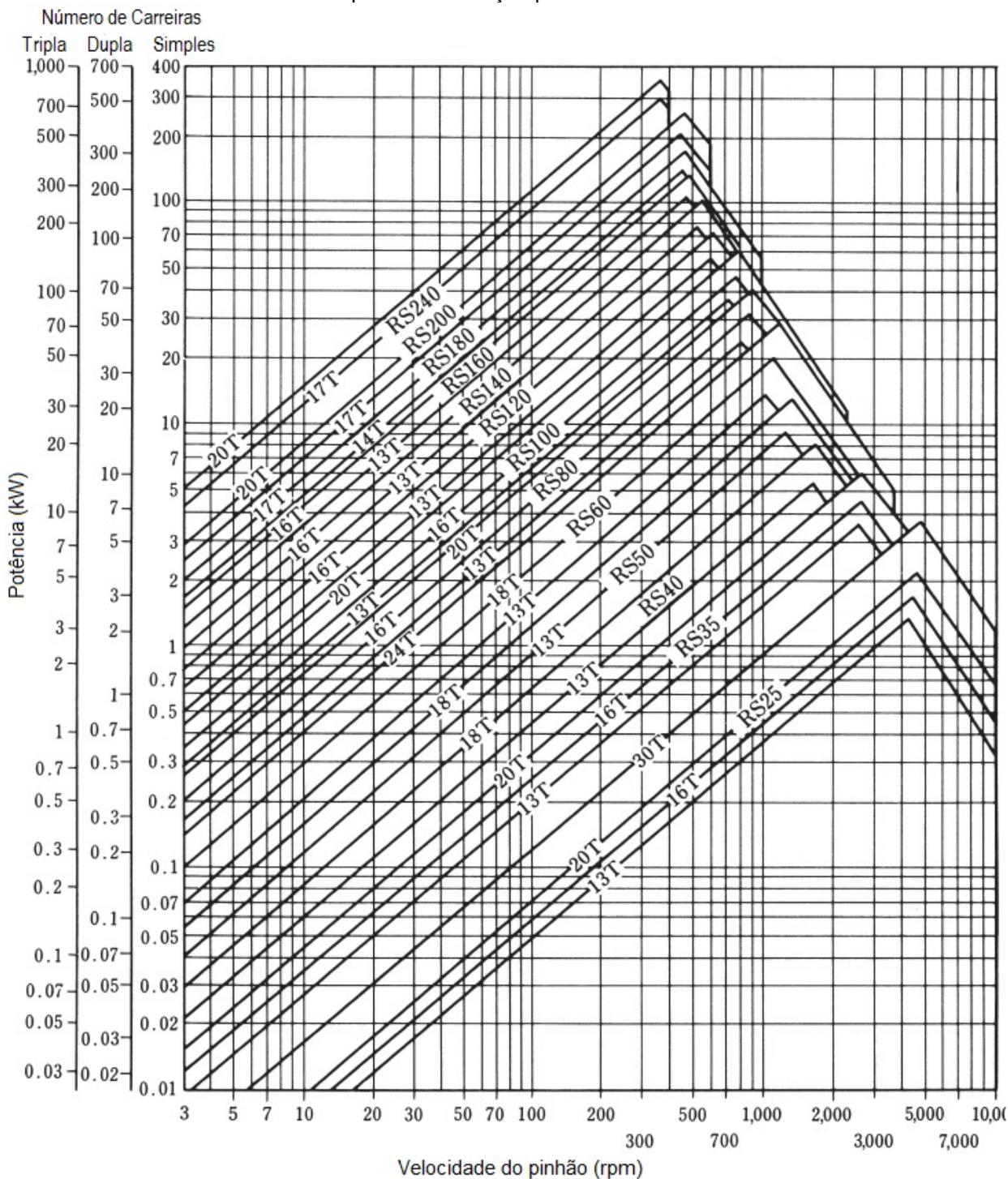
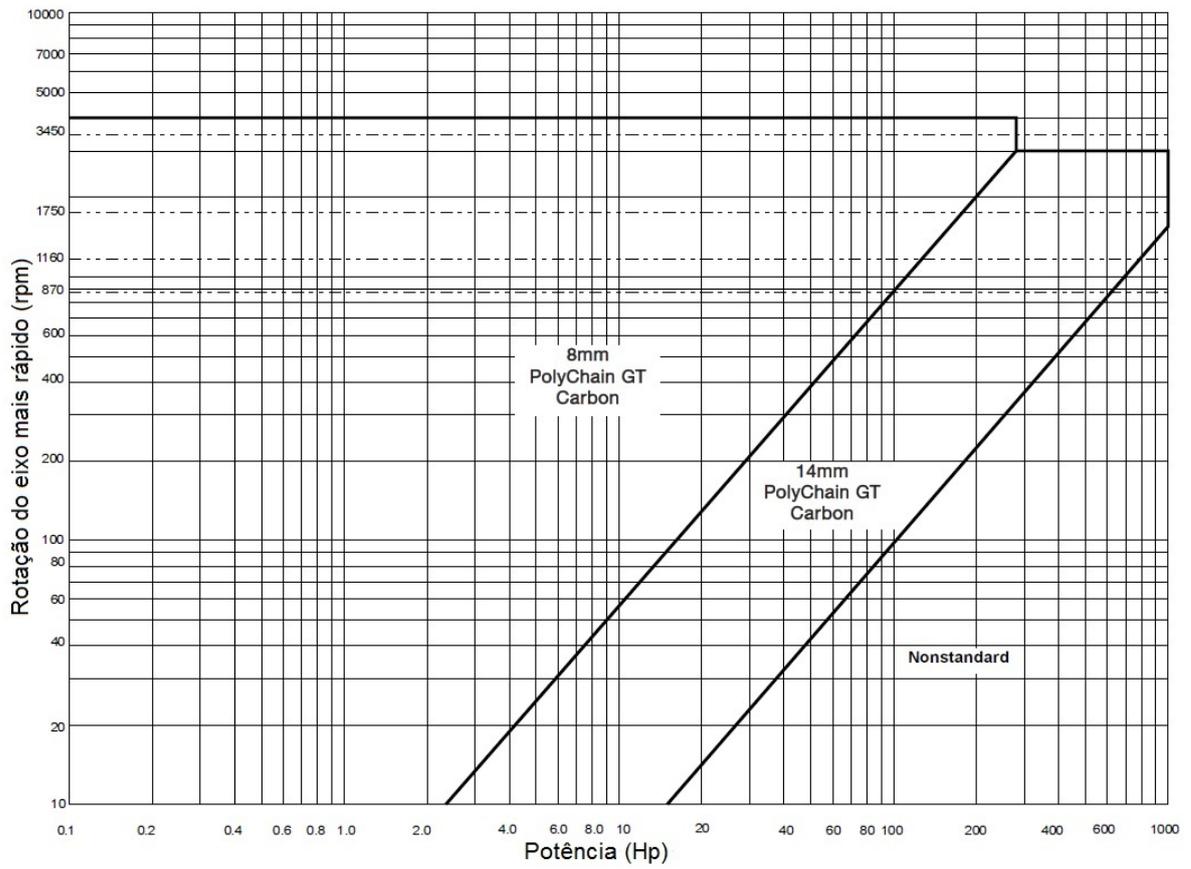
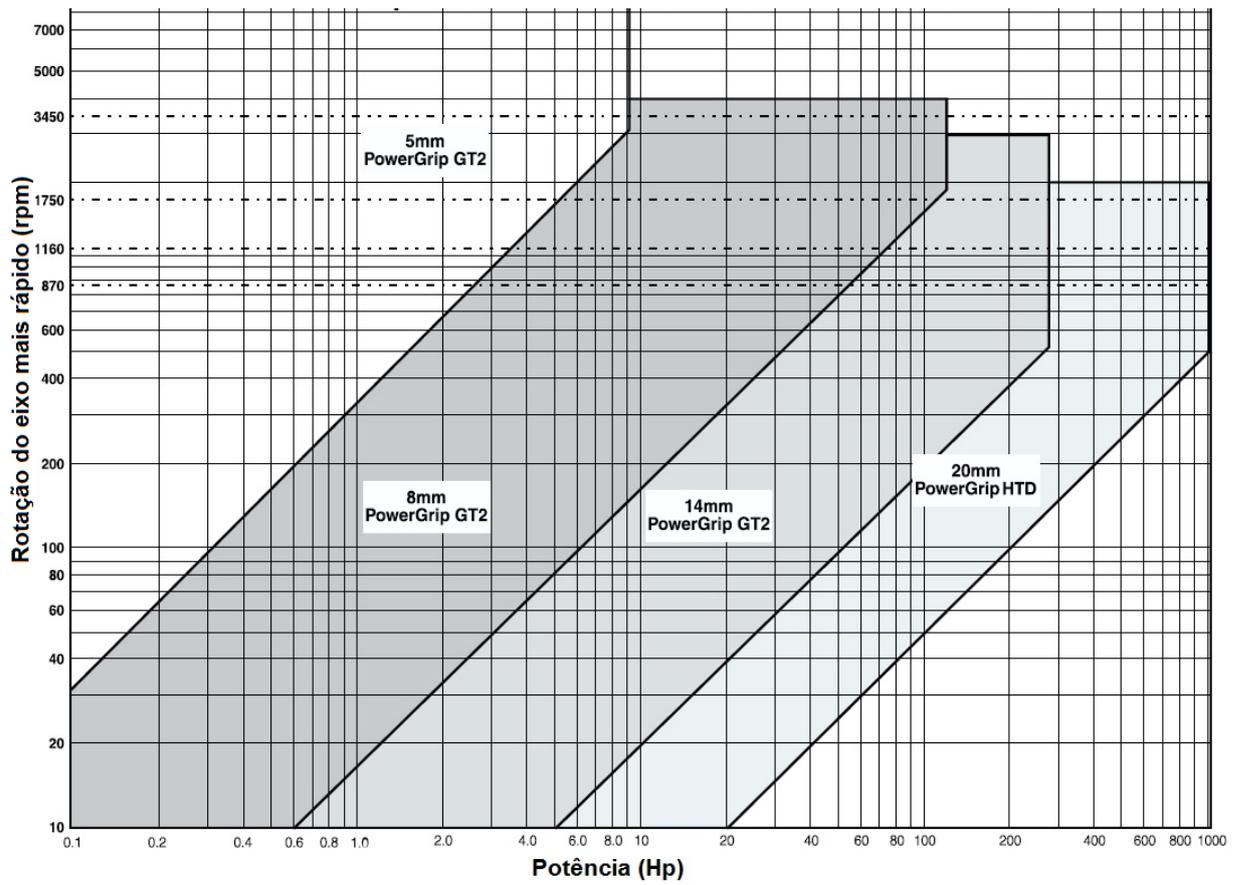


Gráfico F.2: Gráfico potência x rotação para correias sincronizadas PU.



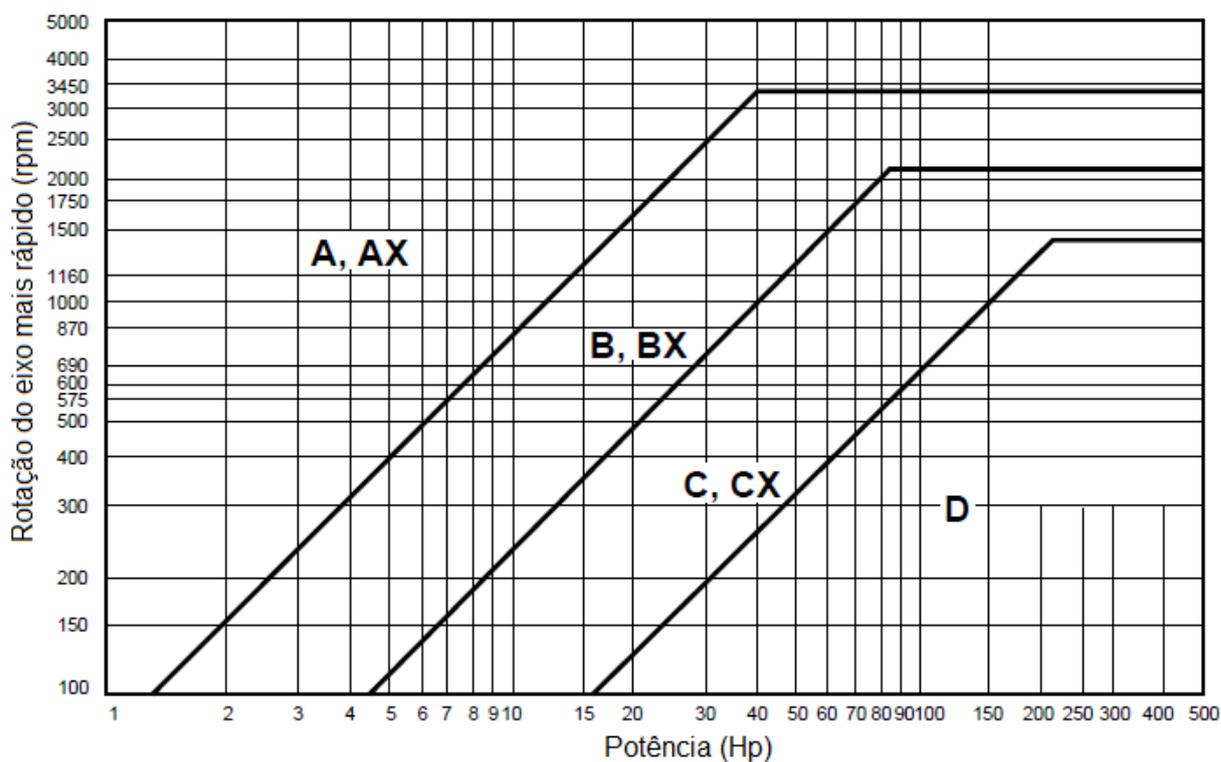
Fonte: Gates 2015

Gráfico F.3: Gráfico potência x rotação para correias sincronizadas NE.



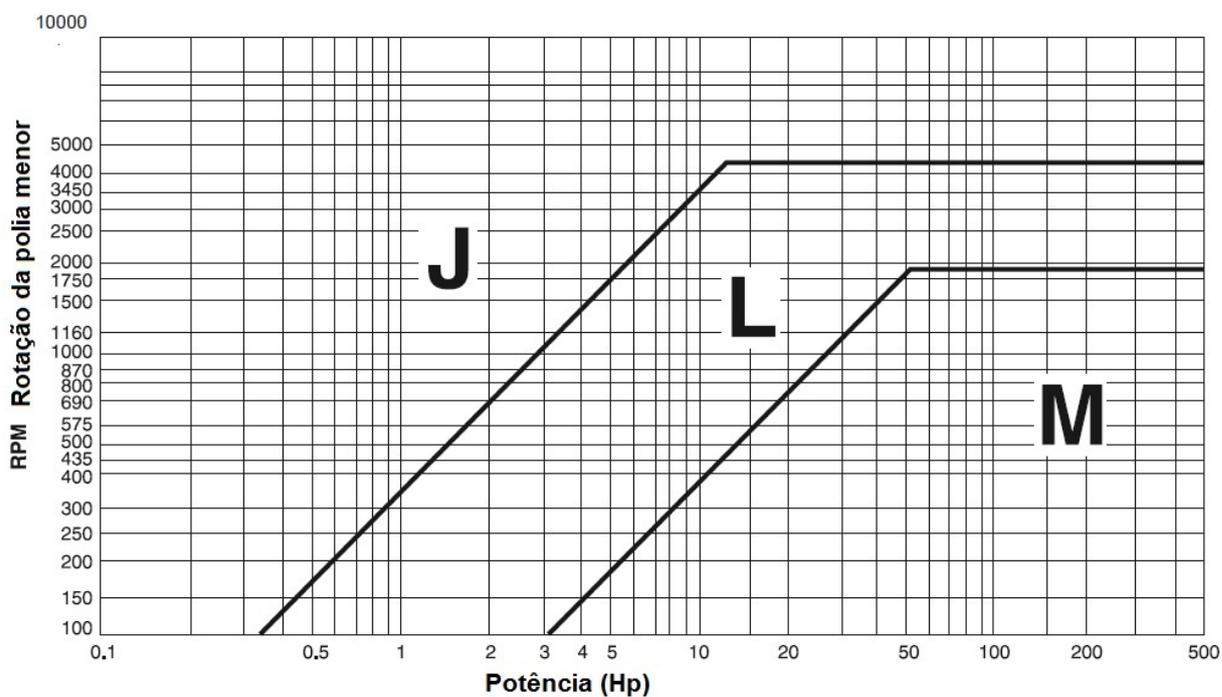
Fonte: Gates 2015

Gráfico F.4: Gráfico potência x rotação para correias em V clássicas.



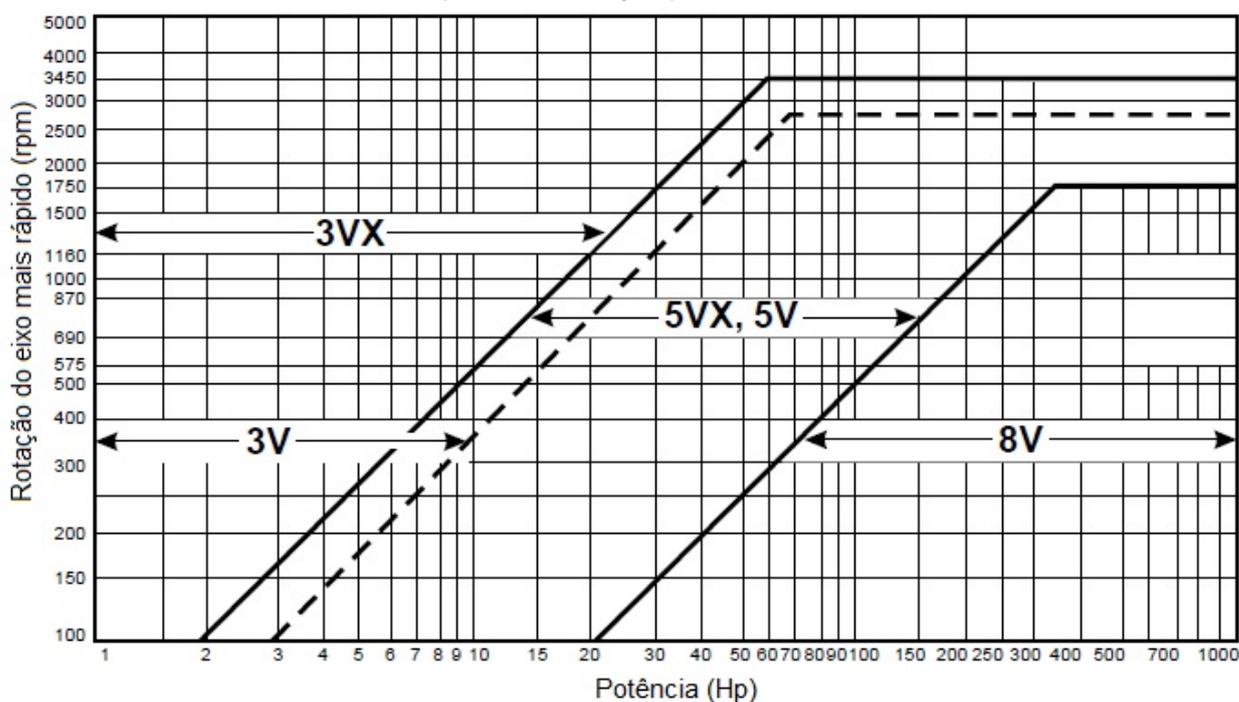
Fonte: Gates 2015

Gráfico F.5: Gráfico potência x rotação para correias micro V.



Fonte: Gates 2015

Gráfico F.6: Gráfico potência x rotação para correias em V estreitas.



Fonte: Gates 2015

Tabela F.5: Matriz de decisão fixação cubo-eixo.

Requisitos de aplicação – Fixação cubo-eixo	Bucha QD	Bucha TL	Anel de Fixação	Chaveta
Qual a tensão de escoamento da chaveta σ_{ch} (MPa)?				
Qual a tensão de escoamento do eixo σ_{eixo} (MPa)?				
Qual a tensão de escoamento do cubo σ_{cubo} (MPa)?				
Qual o torque a ser transmitido T (Nm)?				
Qual o diâmetro do eixo onde é montado o elemento de fixação (mm)?				
Qual o diâmetro do eixo (barra redonda) d_{eixo} (mm)?				
Qual o diâmetro máximo (mm)?				
Qual o comprimento total do eixo L_{eixo} (mm)?				
Qual a espessura da parede do eixo S se for um tubo (mm)?				
Qual o diâmetro do cubo D_{cubo} (mm)?				
Qual o comprimento do cubo L_{cubo} (mm)?				
Qual o peso máximo (kg)?				
Deverá permitir ajuste radial?	0	0	10	0
Deverá permitir ajuste axial?	5	5	10	5
O cubo deverá ter usinagem de baixa precisão?	0	0	10	1
O cubo deverá ter usinagem simples?	0	0	10	4
Eixo não deverá ter usinagem radial de precisão?	10	10	10	0
Eixo não deverá ter nenhuma usinagem?	0	0	10	0
Manutenção deverá ser rápida, de baixo custo e ferramental simples?	10	10	10	1
O cubo deverá ser compacto, pequeno diâmetro e inércia?	5	5	2	10
Deverá ter baixo custo?	2	3	4	10
É imprescindível disponibilidade/Logística?	5	5	5	10
Deve possibilitar absorção de sobrecarga?	0	0	10	0

Fonte: Própria

Tabela F.6: Matriz de decisão eixos.

Requisitos de aplicação	Barra Laminada	Barra Trefilada	Barra Retificada	Tubo Mecânico	Tubo Trefilado
Qual o diâmetro externo em bruto (mm)?					
Qual o diâmetro externo final (mm)?					
Qual a área da seção transversal mínima (mm ²)					
Qual o momento de inércia mínimo necessário (mm ⁴)?					
Qual a tensão de escoamento do eixo σ_{eixo} (MPa)?					
Qual o comprimento (mm)?					
Se for um tubo qual a espessura da parede?					
Qual a pressão externa (MPa)?					
É necessário eixo sem usinagem radial?	0	6	10	0	6
É necessária usinagem de <i>features</i> profundas?	10	10	10	5	0
É necessária flexibilidade de geometria/layout?	10	10	10	5	3
É necessária variedade de ligas e materiais?	10	10	5	5	5
É necessário processo de tratamento térmico?	10	10	5	5	2
É necessária relação peso/inércia elevada (dinâmica)?	0	0	0	5	10
É necessária relação peso/rigidez elevada (cargas)?	0	0	0	5	10
É necessária suportar altas pressões radiais?	10	10	10	6	3
É necessária baixa sensibilidade a concentração de tensões?	10	10	10	5	2
É necessária facilidade de balanceamento?	5	8	10	3	7
É imperativo baixo custo por peso?	10	7	5	6	4
É necessária ampla disponibilidade/logística?	10	9	5	6	3

Fonte: Própria

ANEXO G: DESCRIÇÃO DAS FUNÇÕES DE APLICAÇÃO DAS CLASSES DE COMPONENTES

Mancalização:

- **Mancal de rolamento:** devido à grande diversidade de tipos de rolamentos estes podem suprir a maioria dos requisitos das aplicações tendo como principais características: suportam cargas em todas as direções inclusive combinadas, aplicações em altas velocidades mesmo com altas cargas, devido ao princípio de funcionamento possuem baixo torque e temperatura de operação, podem compensar desalinhamentos, atuam como lado livre e fixo, podem ser fornecidos abertos ou vedados, alguns tipos podem ser facilmente desmontados e permitem ajuste da folga entre os elementos rolantes e os anéis, podem ser montados em buchas. As séries mais comuns têm logística simples pois são facilmente achados e tem custo relativamente baixo. Há modelos que dispensam a fabricação do alojamento, exigem lubrificação, são pouco compactos na direção axial e tem baixa capacidade de amortecimento.
- **Mancal de deslizamento:** mais comumente aplicados em cargas radiais, outras direções requerem arranjos de buchas, são aplicados em baixas velocidades, altas velocidades apenas com baixas cargas ou com sistemas de lubrificação específicos, são compactos na direção radial, tem elevada capacidade de amortecimento, os auto lubrificantes dispensam o processo de lubrificação. Como funcionam pelo princípio de deslizamento, operam em maiores temperaturas, e com maior torque de operação. Em função do atrito de deslizamento, para evitar desgaste no eixo deve-se respeitar a relação de dureza entre a bucha e o eixo, além disto o eixo deve ser feito com rugosidade controlada para evitar desgaste prematuro da bucha. Não possuem ajuste de folga, tem baixa precisão de giro, não compensam desalinhamentos, atuam como lado livre, para lado fixo é necessário um arranjo de buchas, tem baixo custo, e logisticamente são fáceis de achar.

Transmissão de potência:

- **Correntes:** aplicadas em velocidades médias a baixas e com elevadas cargas, sincroniza os eixos, necessitam lubrificação, tem elevada inércia e alongação o que exige manutenção para retencionamento ou tensionadores que compensem este efeito, são compactas, propiciam flexibilidade de *layout*, acionam vários eixos paralelos que podem girar na mesma direção ou em sentidos opostos, podem ser aplicadas a grandes distâncias entre centros, com a vantagem de que o ajuste da distância entre centros é bem mais flexível que nas correias pois depende do número de elos usados, pode operar em altas temperaturas dependendo do lubrificante usado, alta disponibilidade logística, fácil manutenção, média absorção de choques e índice de ruídos, baixo custo, fácil disponibilidade logística, trabalham com relações de transmissão até 1:8, e tem elevada eficiência.
- **Correias sincronizadas:** as de PU (poliuretano) são aplicadas em velocidades altas e baixas e com cargas leves e pesadas porém tem alto custo, baixa disponibilidade logística, as de correias sincronizadas de NE (Neoprene) são aplicadas nas mesmas faixas de velocidades das de PU, porém com cargas de médias a baixas, possuem custo médio, bem como boa disponibilidade logística, sincroniza os eixos, não necessitam lubrificação, tem baixa inércia, sem alongação, exigem pouca manutenção, são compactas as de PU comparáveis a correntes, propiciam flexibilidade de *layout*, acionam vários eixos paralelos que podem girar na mesma direção ou em sentidos opostos, podem ser aplicadas a grandes distâncias entre centros, porém a distância entre centros depende do comprimento fixo das correias ou do uso de uma polia intermediária, pouco resistente a altas temperaturas e agentes químicos, fácil manutenção, média absorção de choques, elevada eficiência e trabalham com relações de transmissão até 1:6.
- **Correias em V e micro V:** são aplicadas em velocidades médias a altas e com cargas leves a moderadas, tem baixo custo, as correias em V tem excelente disponibilidade logística, já as micro V pouca disponibilidade logística, não necessitam lubrificação, tem baixa inércia, possuem alongação, exigem

manutenção para retencionamento, são pouco compactas comparadas as correntes, correias sincronizadas e engrenagens, as correias micro V permitem o uso de polias de pequeno diâmetro comparadas as outras correias, propiciam flexibilidade de *layout*, acionam vários eixos paralelos que podem girar na mesma direção ou em sentidos opostos, podem ser aplicadas a grandes distâncias entre centros, porém a distância entre centros depende do comprimento fixo das correias ou do uso de uma polia intermediária para o ajuste, são pouco resistentes a altas temperaturas e agentes químicos, fácil manutenção, elevada absorção de choques, baixa geração de ruídos, média eficiência e trabalham com relações de transmissão até 1:6 para correias em V e 1:8 para micro V.

- **Engrenagens:** helicoidais e de dentes retos podem ser aplicadas em velocidades médias a baixas e com elevadas potências e cargas, com alta eficiência e confiabilidade, porém a helicoidal gera menor índice de vibração e ruído, a coroa e sem fim, devido a sua baixa eficiência é indicada para baixas potências e baixas e médias velocidades, como característica principal permite relações de transmissão de até 1:100 por par, ao passo que as engrenagens de dentes retos e helicoidais até 1:8. As engrenagens sincronizam a movimentação dos eixos, necessitam lubrificação, tem baixa inércia, sem alongação, exigem baixa frequência de manutenção que é atrelada a vida do lubrificante, porém exigem mão de obra qualificada, são compactas, propiciam baixa flexibilidade de *layout* pois as distâncias entre centros devem ser precisas e são fixas dependendo do tamanho das engrenagens, acionam vários eixos paralelos que giraram em sentidos opostos, na coroa e sem fim normalmente os eixos estão a 90°, são resistentes a altas temperaturas dependendo do lubrificante usado, a disponibilidade logística é relativa e depende das relações de transmissão e potência a ser transferida, baixo carregamento nos mancais, baixa absorção de choques, o custo é mais elevado nas helicoidais, médio nas retas e baixo para a coroa e sem fim.

Fixação cubo-eixo:

- **Chavetas:** é um elemento para restrição do movimento radial relativo entre cubo e eixo, de concepção simples sem subpartes, porém exigente nos requisitos da interface com eixo e cubo em relação a precisão.
- **Buchas QD e TL:** são elementos para restrição do movimento radial e axial relativo entre cubo e eixo, fazem uso de chaveta, dispensam usinagem radial de precisão no eixo, e tem como filosofia a facilidade e rapidez de montagem e desmontagem.
- **Anel de fixação:** são elementos para restrição do movimento radial e axial relativo entre cubo e eixo, dispensam usinagem radial de precisão no eixo e no cubo além do alojamento no cubo ser um simples rebaixo, tem como filosofia a facilidade e rapidez de montagem e desmontagem.

Eixos:

- **Maciços:** são elementos rígidos estruturais e para a transmissão de potência, pela geometria aceitam a execução de qualquer tipo de *feature*, os retificados estão prontos para o uso bem como os trefilados que dependem de componentes que não exigem precisão, já os laminados para serem montados com outros componentes dependem de usinagem.
- **Tubos:** são elementos rígidos estruturais e para a transmissão de potência, pela geometria não aceitam *features* profundas, os trefilados estão prontos para o uso com componentes que não exigem precisão. Apresentam baixa inércia e peso comparados aos maciços, também podem ser usados para condução de fluidos.