



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA –UFSC
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

“UTILIZAÇÃO DA ABORDAGEM AXIOMÁTICA NO
PROCESSO DE TOMADA DE DECISÕES PERTINENTES AO
PROJETO CONCEITUAL DE PRODUTOS”

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA
À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

VALDEON SOZO

FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO DE 2002.

UTILIZAÇÃO DA ABORDAGEM AXIOMÁTICA NO PROCESSO
DE TOMADA DE DECISÕES PERTINENTES AO
PROJETO CONCEITUAL DE PRODUTOS

VALDEON SOZO

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA**

ESPECIALIDADE EM ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA
FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

FERNANDO A. FORCELLINI, Dr. Eng. – ORIENTADOR

ANDRÉ OGLIARI, Dr. Eng. – CO-ORIENTADOR

JOSÉ A. BELLINI DA CUNHA NETO, Dr. Eng. – COORDENADOR DO CURSO

BANCA EXAMINADORA

JOÃO CARLOS ESPÍNDOLA FERREIRA, Ph. D. – PRESIDENTE

MIGUEL FIOD NETO, Dr. Eng.

CRISTIANO VASCONCELLOS FERREIRA, Dr. Eng.

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais, Valdir e Vani, pelo incentivo,
amor e ensinamentos recebidos durante toda a minha vida*

AGRADECIMENTOS

A Deus pela perseverança e saúde que me foram dadas e pela sua companhia em todos os momentos.

À minha família e a meus amigos que mesmo à distância souberam estar presentes de uma forma ou outra.

Aos Professores Fernando Forcellini, Dr. Eng. e André Ogliari, Dr. Eng. pelo apoio, orientação e conhecimentos que me foram dispensados.

Ao Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. G. Höhne pela colaboração e orientação na elaboração desta dissertação durante o período de três meses na *Technische Universität Ilmenau - Fakultät für Maschinenbau* da Alemanha.

Ao professor Dr. Daniel D. Frey do Instituto Tecnológico de Massachusetts pelas orientações fornecidas por meios eletrônicos.

A empresa Multibrás S.A Eletrodomésticos pelo apoio e recursos fornecidos.

Aos amigos e colegas de trabalho pelo companheirismo, ajuda e troca de experiências.

À Universidade Federal de Santa Catarina, pela oportunidade concedida para a realização do Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica.

À CAPES, pelo apoio financeiro recebido.

A todos, por fim, muito obrigado.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - Problemática	1
1.2 - Objetivo geral	3
1.3 - Objetivos específicos	4
1.3.1 - Analisar a abordagem axiomática visando sua utilização no processo de tomada de decisões do Modelo Consensual	4
1.3.2 - Definir métricas utilizadas no processo de tomada de decisões	4
1.3.3 - Desenvolvimento de uma ferramenta visando suportar o processo de tomada de decisões com base na abordagem axiomática.	4
1.4 - Justificativas	5
1.5 - Metodologia	6
1.6 - Estrutura do trabalho	7
2 - O PROCESSO DE PROJETO	9
2.1 - Introdução	9
2.2 - Aspectos históricos	9
2.3 - Definições	12
2.4 - O processo de projeto	14
2.5 - O processo de tomada de decisões na fase de projeto conceitual	17
2.6 - Análise crítica do processo de tomada de decisões envolvendo a seleção de concepções alternativas	20
2.7 - Considerações finais	21
3 - A ABORDAGEM AXIOMÁTICA	24
3.1 - Introdução	24
3.2 - Histórico	24
3.3 - Conceitos da abordagem axiomática de projeto	25
3.3.1 - Domínios	26
3.3.2 - Hierarquia	28
3.3.3 - “Ziguezague”	29

3.3.4 - Axiomas de projeto	29
3.4 - Matriz de projeto	32
3.5 - O processo de projeto segundo a abordagem axiomática e as equivalências com o Modelo Consensual	39
3.6 - Pesquisas em Projeto Axiomático	44
3.7 - Considerações finais	46
4 - A ABORDAGEM AXIOMÁTICA NA SELEÇÃO DE CONCEPÇÕES ALTERNATIVAS	48
4.1 - Introdução	48
4.2 - Reformulação da Abordagem Axiomática	48
4.3 - Métricas de avaliação segundo a abordagem axiomática para seleção de concepções alternativas	53
4.3.1 - Representação gráfica do mapeamento entre os domínios físico e funcional	54
4.3.2 - Métricas de avaliação para o primeiro critério	58
4.3.3 - Métricas de avaliação para o segundo critério	66
4.4 - Preenchimento da matriz de projeto	75
4.4.1 - Preenchimento através de avaliações subjetivas	75
4.4.2 - Preenchimento através de avaliações analíticas	77
4.5 - Conjunto de atividades para a seleção de concepções alternativas por meio da abordagem axiomática	77
4.6 - Considerações finais	79
5 - IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL	80
5.1 - Introdução	80
5.2 - Descrição da ferramenta computacional	80
5.3 - Algoritmos utilizados no cálculo das métricas	84
5.3.1 - Algoritmo para o cálculo da métrica I	84
5.3.2 - Algoritmo para o cálculo da métrica A_i	86
5.3.3 - Algoritmo para o cálculo da métrica T_c	86
5.4 - Considerações finais	87
6 - ESTUDO DE CASO	88
6.1 - Introdução	88
6.2 - Problema de projeto	88

6.3 - Definição dos requisitos funcionais	89
6.4 - Definição dos parâmetros de projeto	90
6.5 - Preenchimento da matriz de projeto	94
6.5.1 - Descrição dos relacionamentos entre o RF ₁ e os PPs	94
6.5.2 - Descrição dos relacionamentos entre o RF ₂ e os PPs	99
6.5.3 - Descrição dos relacionamentos entre o RF ₃ e os PPs	99
6.5.4 - Descrição dos relacionamentos entre o RF ₄ e os PPs	99
6.5.5 - Descrição dos relacionamentos entre o RF ₅ e os PPs	102
6.5.6 - Matriz de projeto para as soluções A e B	102
6.6 - Cálculo das métricas e seleção das soluções	103
6.7 - Considerações finais	105
7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	108
7.1 - Introdução	108
7.2 - Conclusões	108
7.3 - Recomendações	110
APÊNDICE A	112
A.1 - Introdução	112
A.2 - Descrição da obtenção dos elementos da matriz de projeto A₁₁ e A₁₂	113
A.3 - Descrição da obtenção dos elementos da matriz de projeto A₄₂ e A₄₄	114
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	116

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.1 – Estrutura do trabalho</i>	7
<i>Figura 2.1 – Metodologia de projeto</i>	14
<i>Figura 2.2 - Modelo Consensual para o projeto sistemático de produtos</i>	15
<i>Figura 2.3 - Quatro técnicas de avaliação propostas por Ullman (1992).</i>	20
<i>Figura 2.4 - Exemplo de uma matriz de avaliação, adaptado de Back (1993).</i>	21
<i>Figura 2.5 - Exemplo parcial de uma matriz de decisão, adaptado de Ullman (1992),</i>	22
<i>Figura 3.1 – Os quatro domínios do projeto axiomático e seus elementos.</i>	26
<i>Figura 3.2 – Exemplo de hierarquia de projeto.</i>	28
<i>Figura 3.3 – Exemplo de ziguezague.</i>	29
<i>Figura 3.4 – Exemplo violando o primeiro axioma de projeto.</i>	30
<i>Figura 3.5 – Exemplo respeitando o primeiro axioma de projeto.</i>	31
<i>Figura 3.6 – Exemplo de abridor de latas onde mantém-se a independência dos RFs.</i>	32
<i>Figura 3.7 – Descrição do relacionamento entre domínios.</i>	33
<i>Figura 3.8 – Representação gráfica da matriz de projeto para as três soluções possíveis.</i>	34
<i>Figura 3.9 – Concepções da máquina a vapor segundo: (a) Newcomen e (b) Watt, adaptado</i>	36
<i>Figura 3.10 – Soluções para misturar tintas: (a) vinculada ; (b) semivinculada.</i>	38
<i>Figura 3.11 – Exemplo de utilização da Casa da Qualidade para “traduzir”</i>	40
<i>Figura 4.1 - Abordagem axiomática conforme Suh (1990).</i>	49
<i>Figura 4.2 - Abordagem proposta</i>	51
<i>Figura 4.3 – Representação gráfica do mapeamento entre RFs e PPs,</i>	55
<i>Figura 4.4 – Representação gráfica de uma solução não vinculada</i>	56
<i>Figura 4.5 – Representação gráfica de uma solução semivinculada</i>	56
<i>Figura 4.6 – Representação gráfica de uma solução vinculada</i>	57
<i>Figura 4.7 – Representação gráfica da importância do paralelismo entre os eixos.</i>	58
<i>Figura 4.8 – Representação gráfica da equação (4.5)</i>	59
<i>Figura 4.9 – Ilustração gráfica do conteúdo de informações.</i>	68
<i>Figura 4.10 – Representação gráfica para o cálculo do conteúdo de informações.</i>	69
<i>Figura 4.11 – Representação do limite de projeto de soluções vinculadas através de poliedros convexos no espaço bidimensional.</i>	70
<i>Figura 4.12 – Representação do limite do sistema e do intervalo comum.</i>	71
<i>Figura 4.13 – Resumo do processo de seleção de concepções proposto.</i>	78
<i>Figura 5.1 – Tela de apresentação da ferramenta computacional.</i>	81
<i>Figura 5.2 – Matriz de coleta de dados sobre os requisitos funcionais.</i>	82
<i>Figura 5.3 – Matriz de coleta de dados sobre os parâmetros de projeto.</i>	82
<i>Figura 5.4 – Matriz de projeto.</i>	83
<i>Figura 5.5 – Resultado das métricas</i>	83

<i>Figura 6.1 – Solução A para o problema proposto.</i>	91
<i>Figura 6.2 – Solução B para o problema proposto.</i>	93
<i>Figura 6.3 – Vista frontal da porta do fogão ilustrando a área visualização.</i>	95
<i>Figura 6.4 – Modelo de resistências térmicas para a solução A.</i>	96
<i>Figura 6.5 – Modelo de resistências térmicas para a solução B.</i>	98
<i>Figura 6.6 – Vista lateral da porta ilustrando sua deflexão.</i>	100
<i>Figura 6.7 – Resultado das métricas para a solução A.</i>	104
<i>Figura 6.8 – Resultado das métricas para a solução B.</i>	104

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 2.1 - Principais tarefas e as decisões da fase de projeto conceitual</i>	18
<i>Tabela 3.1 – Elementos de projeto de cada domínio</i>	27
<i>Tabela 3.2 – Classificação de projetos de diversas áreas segundo os quatro domínios da abordagem axiomática. (Suh, 1995)</i>	28
<i>Tabela 3.3 – Comparação entre os modelos de produto no Modelo Consensual e</i>	43
<i>Tabela 4.1 – Avaliação de alternativas de projeto vinculadas e semivinculadas: caso particular</i>	52
<i>Tabela 4.2 – Exemplos de soluções: (a) vinculadas, (b) semivinculadas</i>	53
<i>Tabela 4.3 – Avaliação de alternativas de projeto vinculadas segundo as métricas R e S</i>	61
<i>Tabela 4.4 – Avaliação de alternativas de projeto vinculadas segundo métrica Tc</i>	63
<i>Tabela 4.5 – Avaliação de alternativas de projeto semivinculadas segundo as métricas R e S</i>	64
<i>Tabela 4.6 – Avaliação de alternativas de projeto semivinculadas segundo métrica Ai</i>	65
<i>Tabela 4.7 – Avaliação de alternativas de projeto não vinculadas segundo métrica I</i>	69
<i>Tabela 4.8 – Valores da métrica I para cada alternativa de projeto</i>	69
<i>Tabela 4.9 – Exemplo de alternativas de projeto segundo a abordagem axiomática</i>	74
<i>Tabela 4.10 – Conteúdo de informação e representação do intervalo comum das alternativas</i>	74
<i>Tabela 6.1 – Especificação dos RFs</i>	90
<i>Tabela 6.2 – Especificação dos PPs para a Solução A</i>	92
<i>Tabela 6.3 – Especificação dos PPs para a Solução B</i>	94
<i>Tabela 6.4 – Resultado das métricas obtidas com a ferramenta computacional</i>	105
<i>Tabela 6.5 – Seleção das concepções através do método de Pugh</i>	106

LISTA DE SIGLAS

A	Matriz de projeto
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Enginnering</i>
DFx	<i>“Design for X”</i>
DOE	<i>Design of Experiments</i>
FAST	<i>Functional Analysis System Technique</i>
IDEF0	Integration Definition For Function Modeling
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
NeDIP	Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
PP	Parâmetro de projeto
QFD	<i>Quality Function Deployment</i>
R	Restrição de projeto
RF	Requisito funcional
RU	Requisito do usuário
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
VP	Variável de processo

RESUMO

O projeto conceitual de produtos visa obter uma ou mais concepções de produto para satisfazer os clientes do projeto, traduzidos na forma de manifestações oriundas das fontes de problemas e ou necessidades de projeto. Estas concepções, denominadas concepções alternativas, são muitas vezes o ponto forte do processo de projeto devido à elevada quantidade gerada das mesmas e simultaneamente o ponto fraco, devido à dificuldade de apreciar todas as alternativas, pois os critérios para avaliá-las nem sempre são evidentes.

Através de uma análise crítica do processo de tomada de decisões envolvendo a seleção de concepções alternativas, pode-se observar que os diferentes métodos existentes na literatura primam pela clareza e simplicidade do projeto e, na maioria dos casos apresentam como critério as especificações de projeto que, logicamente irão diferenciar-se de projeto para projeto. Conclui-se então que existem critérios e orientações a serem seguidos no processo de tomada de decisões. Porém estes são muitas vezes dependentes do domínio em questão inexistindo um conjunto de especificações de projeto que possa ser usado de modo geral para todas as áreas de projeto.

Através de uma análise da abordagem axiomática de projetos, identificou-se que os axiomas de projeto são considerados como medidas da qualidade do projeto aplicáveis a todas as áreas de projeto, (Suh, 1990) mas a forma como se apresentavam, seja por definição ou por carência de métricas para mensurá-los, dificultava a sua aplicação em determinadas situações de projeto.

Tais axiomas foram então redefinidos na forma de critérios ou metas a serem otimizadas e pela introdução de novas métricas conseguiu-se expressar adequadamente o seu maior ou menor atendimento, possibilitando uma maior abrangência de aplicação à abordagem axiomática.

Propõe-se então neste trabalho um processo de seleção de concepções alternativas envolvendo as novas métricas estabelecidas que, implementado em uma ferramenta computacional possibilita melhores resultados para problemas que se apresentem durante a fase de projeto conceitual de produtos.

ABSTRACT

The objective of the product conceptual design phase is to provide one or more product concepts in order to meet customer requirements, that are translated as wishes from identified problems or project requirements. These concepts, named alternative concepts, are most of the time the power of the design process due to the high quantity of them and on the other side, the weakness, due to the hard work to address the whole alternatives, because the criteria to evaluate them are not always evident.

By means of a critical analysis of the decision making process regarding concept selection, it was verified that the different methods in literature claim for clarity and simplicity of the design and, most of them present design specifications as criteria that, logically will be different from project to project. Thus, one may conclude that there are criteria and orientations to be followed during the decision making process. However, they are almost always domain dependent, having no set of design specifications that could be used for all design fields.

Through an axiomatic design analysis, was verified that the design axioms were considered as quality measures of the design being applicable for all design fields, (Suh, 1990) but the way they were presented, either to their definition or lack of measuring metric, became somehow difficult its application in some cases.

These axioms, were then redefined into criteria or goals to be optimized and by adding new metric was possible to perform suitable evaluations in order to check their meeting, providing a broader axiomatic design application.

Therefore, in this work was proposed a decision process for selecting alternative concepts regarding the new established metric that, implemented in a computational tool provides better results for problems that come up during the product conceptual design phase.

1 - INTRODUÇÃO

*“O sucesso não é uma corrida de
100 metros, é uma maratona.”*

(Firmin Antônio)

1.1 - Problemática

A área de projeto, seja ele dedicado ao produto, processo ou organização, esteve e ainda está passando por um renascimento intelectual, da noção ainda predominante que o projeto pode ser aprendido somente através da experiência para a idéia de que seja tratado sistemática e cientificamente. A escola atual mantém a visão de que boas decisões de projeto não são tão aleatórias quanto pareciam, e sim resultado de um raciocínio sistemático, o qual deve ser utilizado para aumentar as chances de sucesso do projeto.

Embora as práticas de projeto em diferentes áreas pareçam ser distintas, processos cognitivos e princípios de projeto são utilizados por todas elas. Nesse sentido, existem várias maneiras de abordar o tema.

A abordagem axiomática é uma delas, e fornece uma estrutura teórica geral, comum a todas as áreas (Suh, 1995). As pesquisas em projeto axiomático foram iniciadas em 1977, pelo professor *Nam P. Suh*, do MIT (*Massachusetts Institute of Technology*). Segundo *Suh*, a abordagem axiomática tem início com uma premissa diferente: a de que existem princípios generalizáveis que governam o comportamento intrínseco do processo de projeto, denominados axiomas. Os axiomas são princípios gerais ou verdades evidentes, que não podem ser derivadas ou mesmo provadas verdadeiras, exceto pelo fato de não existirem contra-exemplos ou exceções.

Uma outra proposta para o processo de desenvolvimento de produtos, denominada de Modelo Consensual (Ogliari, 1999) e (Ferreira, 1997) vem sendo delineada através de quatro fases principais: projeto informacional, projeto conceitual, projeto preliminar e projeto detalhado. Esta proposta foi estabelecida com base nas metodologias sugeridas por *Back (1983)*, *Pahl & Beitz (1996)*, *Hubka & Eder (1996)*, *Ullman (1992)*, *Blanchard & Fabricky (1990)*, entre

outros. A primeira fase é caracterizada pela descrição precisa do problema, a determinação das necessidades e expectativas dos usuários e, posteriormente, sua priorização e adequação a requisitos mensuráveis. Através de tais informações, realiza-se a segunda etapa do processo, determinando a função global do produto e uma estrutura de funções que o descreve. Desenvolvem-se princípios de solução para cada função, os quais combinados irão constituir concepções para o produto desejado. Realizam-se avaliações de maneira a estimar qual concepção melhor contempla os requisitos de projeto. Na fase de projeto preliminar, os itens críticos são determinados para realização de atividades de modelagem, simulação e análise. Realiza-se um detalhamento prévio do produto considerando seus limites físicos, materiais, interfaces e técnicas de produção. Através da última finalizam-se os detalhamentos de todos os componentes do produto. Tolerâncias, processos, especificações de montagens, entre outras, são determinadas. As informações devem respeitar normas e serem facilmente compreendidas pela manufatura.

Mesmo que os autores abordem o tema de forma diferente, suas orientações permitem concluir que o projeto pode ser entendido como um processo onde se objetiva converter informações que caracterizam as necessidades e requisitos do produto em conhecimento sobre o produto. Na realização deste processo inúmeras decisões devem ser tomadas. Com base na definição proposta por Marston & Mistree (1997) uma decisão pode ser definida como uma alocação de recursos, ocorrendo em um instante no tempo e tendo por base as informações disponíveis no instante em que é realizada. As decisões tomadas na fase de projeto conceitual representam cerca de 20% do desenvolvimento do projeto e, entretanto, comprometem aproximadamente 80% do custo final do produto (Blanchard & Fabricky, 1990).

O processo de projeto também pode ser caracterizado como um processo de tomada de decisões onde a quantidade de informações envolvida é grande. Muitas alternativas podem ser geradas e os critérios para avaliá-las não são sempre evidentes. Analisando as metodologias abordadas na literatura expressas através do Modelo Consensual, verifica-se que critérios aplicáveis a inúmeras áreas de projeto não são contemplados, existindo apenas orientações restritas a alguns domínios específicos. A abordagem axiomática, através dos axiomas de projetos, fornece tais critérios de forma a serem utilizados em todas as áreas de projeto (Suh, 1990).

Assim, pesquisas envolvendo o estabelecimento e utilização de critérios para tomada de decisões constituem-se em contribuição ao processo de desenvolvimento de produtos, motivando a realização deste trabalho. Pretende-se então estudar a abordagem axiomática de

projetos visando contribuir ao processo de tomada de decisões na fase de projeto conceitual e tendo por objetivo maior a satisfação das grandes metas ao se desenvolver um produto: desenvolvê-lo no menor tempo possível, propiciar real satisfação das necessidades e expectativas dos usuários e reduzir o custo do produto ao longo de seu ciclo de vida, superando a concorrência.

A principal justificativa pela escolha da abordagem axiomática reside na possibilidade de utilização dos axiomas de projeto como critérios de seleção. A escolha pela fase de projeto conceitual é justificada pela relação 80-20, ou seja, as decisões tomadas refletem grandes conseqüências em todo ciclo de vida do produto. (Blanchard & Fabricky, 1990)

Também, verifica-se que a abordagem axiomática auxilia o processo criativo, pois fornece meios de avaliar projetos utilizando os axiomas de projeto. Durante a atividade de projeto ocorrem dois processos distintos: o processo criativo, onde idéias ou soluções são elaboradas, e o processo analítico, onde decisões devem ser tomadas para avaliar as idéias propostas. O processo criativo depende fundamentalmente da base de conhecimento e criatividade do projetista, e é subjetivo. Desta forma, pode existir um número infinito de possíveis soluções criativas para satisfazer os mesmos requisitos. Já o processo analítico é determinístico, e é baseado em um conjunto finito de princípios básicos. Estes dois processos são inter-relacionados, uma vez que deve-se descartar idéias inadequadas rapidamente para possibilitar a criação de novas idéias, explorando novas possibilidades. Assim, através da seleção entre “bons” e “maus” projetos a equipe de projeto pode dedicar mais tempo à procura e desenvolvimento de novas soluções.

Pretende-se, desta forma, fazer uso da abordagem axiomática para estabelecer critérios de seleção de projetos a serem aplicados a fase de projeto conceitual, resultando em um processo de tomada de decisões passível de implementação computacional, visando suportar o julgamento do projetista e não substituí-lo.

1.2 - Objetivo geral

Como objetivo geral pretende-se desenvolver e implementar computacionalmente um processo de tomada de decisões envolvendo o estabelecimento e utilização de critérios oriundos da abordagem axiomática.

Através da análise das metodologias existentes, apresentada no capítulo 2 deste trabalho, verificou-se que existem critérios e orientações a serem seguidos no processo de

tomada de decisões durante o processo de projeto. Porém, estes são muitas vezes dependentes do domínio em questão, inexistindo um conjunto de especificações de projeto que possa ser usado de modo geral. Assim, através dos axiomas oriundos da abordagem axiomática de projetos, pretende-se introduzir tais critérios, de modo que possam ser utilizados nas diversas áreas de projeto.

1.3 - Objetivos específicos

Como objetivos específicos, pretende-se:

1.3.1 - Analisar a abordagem axiomática visando sua utilização no processo de tomada de decisões do Modelo Consensual

Os axiomas de projeto propostos por Suh (1990) podem ser tomados como medidas da qualidade do projeto. Porém a absoluta satisfação destes axiomas nem sempre é possível para todos os projetos. Desta forma, a abordagem axiomática será analisada e estruturada de forma que tais axiomas possam ser utilizados como critérios a serem maximizados no processo de tomada de decisões pertinentes a fase de projeto conceitual de produtos.

1.3.2 - Definir métricas utilizadas no processo de tomada de decisões

De forma a selecionar as alternativas de projeto que melhor atendem aos axiomas de projeto serão estabelecidas métricas que reflitam o grau de satisfação destes, orientando a equipe de projeto no processo de tomada de decisões.

1.3.3 - Desenvolvimento de uma ferramenta visando suportar o processo de tomada de decisões com base na abordagem axiomática.

A operacionalização do processo de projeto através de recursos da informática pressupõe a utilização de hardware e software, e de suas potencialidades para agilizar o estabelecimento, codificação, processamento e a futura tomada de decisão diante dos resultados do processamento. Essa agilidade é pretendida pelas capacidades dos recursos da informática, tais como memória, velocidade, reutilização, etc. Desta forma, através da implementação

computacional do processo de tomada de decisões envolvendo a abordagem axiomática, pretende-se usufruir das potencialidades computacionais para agilizar o processamento das informações e a tomada de decisão diante dos resultados do processamento.

1.4 - Justificativas

Em linhas gerais, na breve argumentação sobre cada objetivo descrito anteriormente, foram delineadas algumas justificativas para o desenvolvimento do presente trabalho. Cabe aqui avaliar este assunto sobre uma visão mais abrangente, procurando estabelecer as principais razões teóricas, os motivos práticos e as contribuições pretendidas.

Devido à competitividade acirrada dos tempos modernos, originada pela abertura de novos mercados, a globalização da economia ou mesmo pela maior exigência dos consumidores, o lançamento ou inovação de produtos torna-se uma necessidade vital na superação da concorrência. Conseqüentemente métodos e ferramentas que possam ser empregadas para este fim apresentam-se como necessários.

A importância da utilização de uma metodologia de projeto reside em suportar o raciocínio do projetista quando este necessita entender e resolver um dado problema de projeto, estabelecendo um raciocínio estruturado de maneira lógica. Neste caso, existe uma evolução do raciocínio, desde uma proposição inicial até as conclusões finais. Trata-se da forma sistemática de raciocinar sobre dado problema, o qual constitui um dos fundamentos de uma metodologia. Raciocinando sistematicamente tem-se oportunidade de avaliar um maior número de possibilidades, o trabalho torna-se organizado e a necessidade de retornar a um passo anterior, ou de explicar o que foi feito, torna-se mais fácil conduzindo a maiores chances de resolver o problema.

Na metodologia do processo de desenvolvimento de produtos adotada, o processo de projeto é dividido em quatro fases. A escolha pela fase de projeto conceitual deve-se à importância das decisões que ali ocorrem. A natureza do projeto conceitual é bastante flexível em suas informações e geralmente qualitativa em seus resultados. Não se trata, por exemplo, de especificar uma determinada engrenagem sujeita a um determinado esforço, mas de se definir, em primeiro lugar, se a melhor solução, considerando necessidades e requisitos de projeto, será aquela que envolverá uma engrenagem. Nesta fase, muitas alternativas podem ser geradas e os critérios para avaliá-las não são sempre evidentes. A escolha pela abordagem axiomática deve-se à possibilidade de utilização dos axiomas de projeto como critérios de seleção de projeto

independentes do domínio em questão, de modo que possam ser utilizados nas diversas áreas de projeto.

Portanto, considerando a importância do projeto conceitual de produtos, desde o entendimento adequado do problema até a avaliação de concepções alternativas, justifica-se o propósito do presente trabalho no desenvolvimento de métodos e ferramentas para a solução de problemas de projeto antes mesmo de se pensar em soluções físicas concretas.

1.5 - Metodologia

Inicia-se este trabalho por meio de um levantamento do estado da arte do processo de projeto, descrevendo as linhas de pesquisa e conceitos relativos à metodologia de projeto. Através de tal revisão, será demonstrado que as abordagens frequentemente apresentadas e referenciadas na literatura são bastante similares podendo ser representadas por um modelo de projeto. Analisando tal modelo, denominado Modelo Consensual (Ogliari, 1999) e (Ferreira, 1997), pretende-se demonstrar algumas deficiências deste com relação ao processo de tomada de decisões na fase de projeto conceitual.

Visando sanar tais deficiências, posteriormente realiza-se uma revisão bibliográfica envolvendo a abordagem axiomática, onde os axiomas de projeto fornecidos por tal abordagem proverão meios para auxiliar o processo de tomada de decisões. Tal estudo visa propiciar um entendimento aprimorado e abrangente da abordagem axiomática, permitindo assim um embasamento teórico para realização de análises críticas e sua inclusão no Modelo Consensual.

Posteriormente a abordagem axiomática será analisada e estruturada de forma que seus axiomas possam ser utilizados como critérios a serem maximizados no processo de tomada de decisões do processo de projeto, pois sabe-se que os axiomas de projeto de Suh (1990) são considerados como medidas da qualidade do projeto.

Elabora-se então a ferramenta computacional, visando implementar computacionalmente o processo de tomada de decisões envolvendo a abordagem axiomática e realiza-se um estudo de caso visando sua validação.

1.6 - Estrutura do trabalho

Através da Figura 1.1 ilustra-se a estrutura do presente trabalho, classificado em quatro fases gerais e organizado em sete capítulos.

No capítulo 1, este que se apresenta, é delineado o escopo deste trabalho, descrevendo a problemática, os objetivos e a metodologia a ser utilizada para realização do mesmo.

No capítulo 2, “O Processo de Projeto”, é apresentado um breve histórico do processo de projeto, algumas definições, o Modelo Consensual do processo de projeto e as deficiências a serem sanadas através da abordagem axiomática.

No capítulo 3, “A Abordagem Axiomática”, discute-se os conceitos, aplicações e pesquisas envolvendo a abordagem axiomática de projetos. Através dos conceitos estabelecidos neste capítulo e no capítulo 2, obtém-se as diretrizes para a realização do capítulo 4.

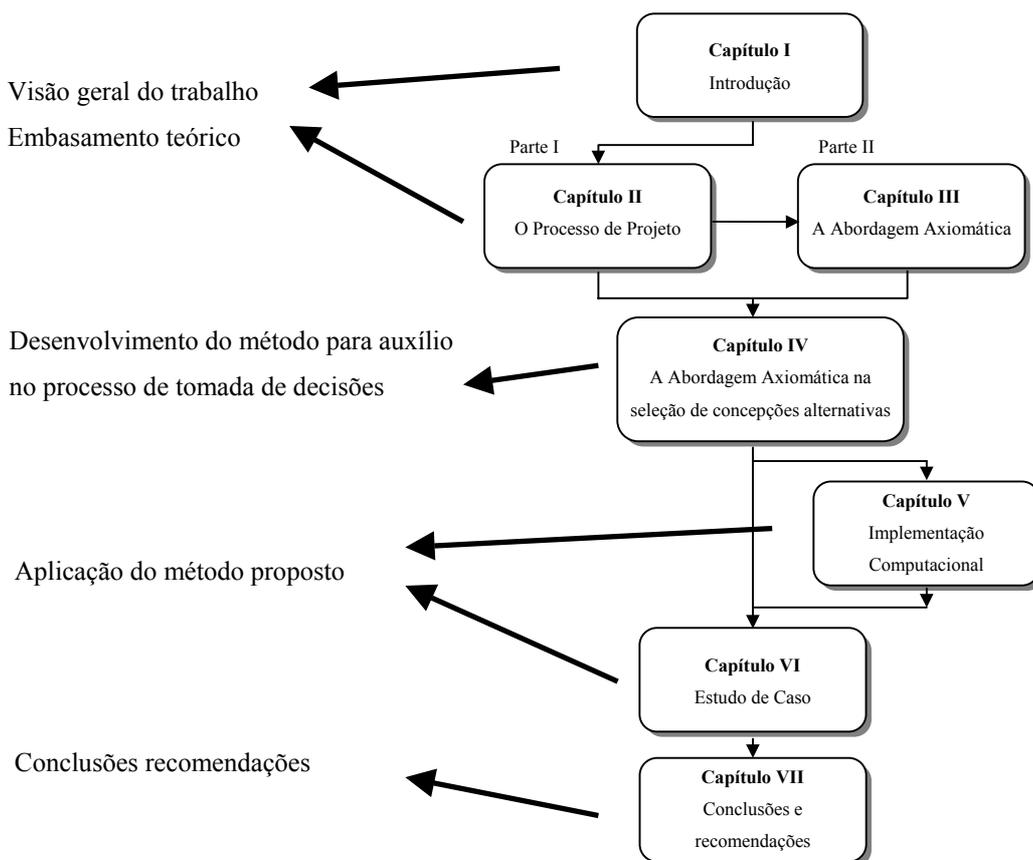


Figura 1.1 – Estrutura do trabalho

No capítulo 4, “A Abordagem Axiomática na seleção de concepções alternativas”, realiza-se uma análise da abordagem axiomática visando estruturá-la de forma que os axiomas possam ser utilizados como critérios a serem maximizados no processo de tomada de decisões, bem como as métricas utilizadas para sua avaliação.

No capítulo 5, “Implementação Computacional”, descreve-se a ferramenta computacional através da qual implementa-se o processo de tomada de decisões com base na abordagem axiomática. Cabe salientar aqui a possibilidade da realização do estudo de caso sem a elaboração da ferramenta computacional. Porém, através da implementação computacional pretende-se usufruir das potencialidades computacionais para agilizar o processamento das informações e a tomada de decisão, auxiliando a realização do estudo de caso e possibilitando futuras utilizações.

No capítulo 6, “Estudo de Caso”, realiza-se o processo de avaliação do processo de tomada de decisões proposto e da ferramenta computacional através de um estudo de caso.

No capítulo 7, “Conclusões e recomendações”, são descritas as considerações finais do trabalho e recomendações para trabalhos futuros.

2 - O PROCESSO DE PROJETO

*“Mudar e mudar para melhor
são duas coisas diferentes.”*

(Provérbio alemão)

2.1 - Introdução

Inicia-se este capítulo com um breve histórico da evolução do processo de projeto, identificando os principais autores e, suas idéias e opiniões sobre o tema. Realiza-se então uma discussão sobre conceitos de metodologia de projeto destacando a vantagem ou não da utilização da mesma. Posteriormente, através de uma análise crítica das metodologias abordadas na literatura, expressas através do Modelo Consensual, resumem-se as principais tarefas e as decisões da fase de projeto conceitual com o objetivo de analisar os critérios para tomada de decisões indicados. Analisando tal modelo, pretende-se mostrar algumas deficiências deste com relação ao processo de tomada de decisões na fase de projeto conceitual a serem sanadas através da abordagem axiomática, descrita no próximo capítulo deste trabalho.

2.2 - Aspectos históricos

De maneira simples, o desenvolvimento de produtos é um empreendimento com início e fim bem determinados, formalmente organizado e, que congrega e aplica recursos visando resultados preestabelecidos. O desenvolvimento de um novo produto compreende a realização do seu projeto em coerência com os planos para sua produção, distribuição e venda. Neste capítulo apresenta-se uma caracterização deste processo, introduzindo-o como uma atividade de engenharia.

Entre as primeiras citações sobre projeto sistemático de produtos, segundo Pahl & Beitz (1996) e Hubka & Eder (1996), destacam-se os trabalhos de *Redtenbacher* (1852) e *Releaux* (1854). Esses autores propuseram, entre outras coisas, alguns princípios básicos de projeto, tais como: projetar sistemas com suficiente resistência e rigidez, baixo desgaste e atrito,

mínimo uso de materiais, baixo peso, fácil montagem e máxima racionalização de recursos. Tais princípios configuram-se numa forma de metodologia de projeto, ou seja, na forma de orientações sobre como o projetista deve proceder diante de problemas que envolvam as variáveis citadas. O termo metodologia de projeto será abordado com maior detalhe ao decorrer deste trabalho.

Com relação ao processo de projeto, Pahl & Beitz (1996) mencionam por exemplo o trabalho de *Erkens* (1928) como um dos pioneiros. Esta abordagem destacava que o desenvolvimento do projeto deveria ser realizado etapa por etapa, com constantes testes, avaliações e balanceamentos entre as demandas conflitantes, até a emergência de uma solução final para o problema. A proposição etapa por etapa tem sido a base da maioria das abordagens atuais sobre metodologia de projeto e consiste em orientações gerais sobre como proceder durante o projeto.

Yoshikawa (1989) também investigou o estado-da-arte em filosofias de projeto. Através de suas pesquisas o autor definiu uma Teoria Geral de Projeto. Tal teoria inicia com considerações sobre a natureza dos objetos e os utiliza para provar teoremas sobre a natureza do projeto. Através de estudos experimentais, Yoshikawa estabeleceu axiomas e métodos para modelagem de informações no processo de projeto. Porém, os axiomas propostos por Yoshikawa são definidos de forma a apenas descrever a natureza do processo de projeto e não para serem utilizados de outras formas, tais como critérios no processo de tomada de decisões.

A Teoria Geral de Projeto implicitamente assume que projetar é realizar um mapeamento partindo-se das funções para a topologia dos atributos, respeitando certas restrições. Ou seja, projetar é definido como um processo onde, dada a descrição das funções desejadas e restrições, chamadas especificações, deve-se fornecer uma descrição de um produto que produza as funções e satisfaça as restrições. (Reich, 1995).

A partir de seus resultados, Yoshikawa (1989) também estabelece que as abordagens para o projeto sistemático de produtos podem ser categorizadas nas seguintes escolas de filosofia de projeto: semântica, sintática, historicista, psicológica e filosófica.

Na escola semântica, encontram-se aquelas proposições cujos fundamentos admitem que qualquer máquina ou sistema técnico, como objeto de projeto, é um sistema que transforma grandezas de entrada em grandezas de saída, do tipo energia, material e informação. Nesse sentido, as diferenças entre as entradas e as saídas são chamadas funcionalidades do produto e definem o caminho inicial para a solução do problema.

Na escola sintática, por sua vez, inserem-se aquelas abordagens que tratam mais

sobre os aspectos procedurais ou morfológicos da atividade de projeto, ou seja, sobre modelos para o processo de projeto. Nesse caso, visando à generalidade na aplicação de metodologias de projeto, os aspectos lógicos ou temporais da metodologia são postos em evidência.

Ambas as filosofias, semântica e sintática, são complementares. A primeira estabelece considerações sobre o objeto de projeto e a segunda, sobre o processo de projeto. Se aplicadas em conjunto, ter-se-á uma metodologia de projeto que, além da lógica do processo de desenvolvimento, considera o significado da existência de determinado produto, no caso, sua funcionalidade. Essa complementaridade tem sido representada na metodologia de projeto proposta por Pahl & Beitz (1996).

As demais escolas de filosofia de projeto se originaram, segundo Yoshikawa (1989) de críticas às metodologias de projeto. Dentre elas, por exemplo, a de que existe uma contradição entre a universalidade de uma metodologia e sua aplicação prática. Nesse caso, conforme a escola historicista, as habilidades de projeto devem ser desenvolvidas a partir da história de casos em projeto, ou seja, de sua prática. As escolas psicológica e filosófica são reportadas como aplicadas da psicologia e da filosofia, com respeito à psicologia da criatividade na engenharia e ao estudo do processo de pensamento humano no projeto, respectivamente.

Em um artigo de revisão Finger & Dixon (1989a) e Finger & Dixon (1989b) também apresentam uma análise detalhada de filosofias, teorias e metodologias de projeto. De particular importância nesse estudo, incluem-se as categorias de modelos do processo de projeto relacionadas pelos autores. Tais modelos são classificados em descritivos, prescritivos e computacionais.

Os modelos descritivos são aqueles que procuram capturar o comportamento do projetista diante de determinadas situações ou problemas práticos de projeto, visando à construção de sistemas inteligentes que os simulem. Nesse sentido, por exemplo, são conduzidos experimentos de projeto em que as diversas ações e manifestações dos projetistas são registradas (em vídeo, fita cassete, entre outros meios) e, posteriormente, analisadas quanto ao seu conteúdo, sintetizando os resultados na forma de modelos prescritivos do projeto.

Os modelos prescritivos, por sua vez, apresentam-se, geralmente, na forma de fluxogramas das atividades de projeto. Representam aquelas filosofias em que o projeto é visto pela sua natureza procedural e iterativa. São, em essência, os planos procedurais, os planos de ações, os algoritmos de projeto, entre outros, como comumente conhecidos na literatura. Nessa categoria são citados autores, tais como: Pahl & Beitz (1996), Hubka (1980), Pugh (1991), Suh (1990) e as normas alemãs VDI 2221.

Segundo Finger & Dixon (1989a) a abordagem axiomática de projetos, de autoria de Suh (1990), trata-se de um modelo prescritivo o qual prescreve os atributos que o objeto de projeto deve ter e não como o processo de projeto deva proceder.

Por último, os modelos computacionais do processo de projeto são aqueles nos quais o projeto é considerado como um processo que mapeia um conjunto de requisitos numa descrição de um produto fisicamente realizável, o qual satisfaz aqueles requisitos. Tratam, em grande parte, de formulações matemáticas para processos de projeto traduzidas na forma de algoritmos computacionais e de sistemas baseados no conhecimento. Aplicam-se, em geral, às fases do projeto preliminar e detalhado do produto, na análise, simulação ou na otimização de soluções de projeto.

Certamente, os trabalhos mencionados anteriormente também tiveram seus antecedentes, e muitos outros se desenvolveram desde aquela época, procurando em geral, investigar, desenvolver e formalizar a atividade de projeto e suas relações com as demais áreas do conhecimento. Demais citações sobre a evolução histórica do conhecimento em projeto sistemático de produtos e filosofias de desenvolvimento poderiam ainda ser abordadas. Entretanto, isso foge aos principais propósitos do presente trabalho. Outros autores, além dos já citados, como Finkelstein & Finkelstein (1983), têm se preocupado com esses aspectos e apresentam estudos que descrevem, de modo mais ou menos detalhado, a evolução do conhecimento em projeto sistemático de produtos e sua importância nos tempos atuais.

2.3 - Definições

Segundo Back (1983) o projeto de engenharia é uma atividade orientada para o atendimento das necessidades humanas, principalmente aquelas que podem ser satisfeitas por fatores tecnológicos de nossa cultura.

Com base na definição de Marston & Mistree (1997) projeto é um processo de resolução de problemas objetivando-se converter informações que caracterizam as necessidades e requisitos do produto em conhecimento sobre o produto, onde o principal papel do projetista é tomar decisões. Os autores estabelecem como decisão uma alocação de recursos, ocorrendo em um instante no tempo e tendo por base as informações disponíveis no instante o qual é realizada.

Ogliari (1999), por sua vez, estabelece projeto como um sistema de ações ou intervenções do projetista que faz evoluir as informações na forma de problemas, para informações na forma de soluções de projeto.

Segundo Project Management Institute (2000), um projeto consiste em um empreendimento temporário, com o objetivo de criar um produto ou serviço único, que é executado por pessoas e restringido por recursos.

Os processos de projeto, no contexto da concepção, constituem o conjunto daquelas atividades, procedimentos e regras que devem ser desempenhadas e aplicadas sistematicamente, desde a atribuição do problema de projeto até a sua solução conceitual. Expressam em essência “o que” o projetista deve fazer para conceber produtos em seus vários níveis de desenvolvimento. Neste sentido a descrição de “como” o projetista deve proceder para conceber o produto é relatada pelos meios, que são o ferramental teórico e prático à disposição do projetista. A “matéria prima” sobre a qual o projetista trabalha e, também “os resultados” a que chega é descrito pelas informações. Através de uma metodologia de projeto, os processos, as informações e os meios são estabelecidos e estruturados de forma a suportar o raciocínio do projetista quando este necessita entender e resolver um dado problema de projeto (Ogliari, 1999).

Analisando a etimologia da palavra metodologia, verifica-se que esta é derivada dos seguintes vocábulos gregos: “*métodos*” e “*logos*”, a qual designa a ciência que estuda os métodos.

Segundo Pahl & Beitz (1996) metodologia de projeto é um curso de ação concreto para o projeto de sistemas técnicos, que deriva seus conhecimentos da ciência de projeto, psicologia cognitiva e da experiência prática em diversos domínios. Inclui planos de ação, estratégias, regras, princípios e métodos para resolver problemas de projeto.

Hubka (1980) define metodologia de projeto como uma teoria geral de procedimentos para resolver problemas de projeto. Está relacionada com a estratégia dos procedimentos, isto é, o caminho geral e as táticas de ação em pequenas parcelas de trabalho.

Evbuomwan et al (1996) estabelece que metodologia de projeto trata-se de uma coleção de procedimentos, ferramentas e técnicas para os projetistas usarem, quando estão projetando.

Através de tais definições, pode-se dizer que metodologia de projeto é **um conjunto de idéias sistematizadas referentes ao estudo de ações, comportamentos e maneiras de proceder, visando solucionar problemas de projeto e envolvendo técnicas, métodos e ferramentas**, onde:

- Técnicas (indicam “o que”) ilustram o conjunto de processos utilizados para obter certo resultado; refletem o conhecimento prático;
- Métodos (indicam “como”) são procedimentos organizados que conduzem a um

certo resultado. Expressam a maneira de fazer as coisas, um modo de proceder, uma forma de raciocínio;

- Ferramentas (indicam “com o que”) são instrumentos empregados para atingir um fim, seguindo um conjunto de ações mais ou menos ordenadas; tratam-se das implementações dos métodos e técnicas

A Figura 2.1 ilustra a associação destas.

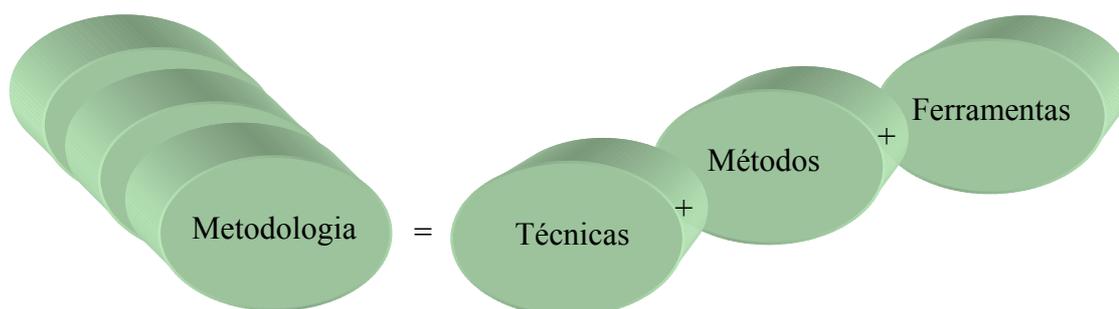


Figura 2.1 – Metodologia de projeto

Sobre a vantagem ou não de se utilizar uma metodologia de projeto, vários argumentos podem ser estabelecidos. Primeiro, raciocinando sistematicamente, tem-se oportunidade de avaliar um maior número de possibilidades, tanto para o problema, quanto para a solução. Isso conduz a maiores chances de entender e de resolver o problema. Segundo, o trabalho torna-se organizado, e a necessidade de retornar a um passo anterior, ou de explicar o que foi feito, torna-se mais fácil, pois as informações sistematicamente estabelecidas entendidas e processadas. Terceiro, implica a utilização das informações de passos anteriores e, com isso, propicia-se a evolução das mesmas, inicialmente qualitativas, até informações detalhadas, concretas e verificadas da solução do problema. Procura-se evitar, por exemplo, que em dado momento o raciocínio seja sobre funções do produto e ao mesmo tempo, sobre sua geometria. Cada coisa deve ser desenvolvida no momento adequado.

2.4 - O processo de projeto

Embora existam diversas proposições de metodologias de projeto, conforme destacado nos levantamentos anteriores, tomando-se como exemplo algumas abordagens freqüentemente apresentadas e referenciadas na literatura, pode-se verificar que elas são bastante similares. Vários modelos de projeto foram criados a fim de aumentar a qualidade dos produtos,

reduzir o seu custo e o tempo de desenvolvimento. No entanto, as diferenças entre eles são, na sua maioria, de origem terminológica (Roozenburg & Eekels, 1995).

Ogliari (1999) e Ferreira (1997) através de uma análise das metodologias propostas por Back (1983), Pahl & Beitz (1996), Hubka & Eder (1996), Ullman (1992), Blanchard & Fabricky (1990) entre outros, realizaram uma análise destas abordagens verificando também que apesar de suas especificidades, apresentam elementos similares. As diferenças ocorrem, normalmente, na terminologia empregada pelos autores e no detalhamento dos processos. Dessa maneira, os autores estabelecem um Modelo de Consenso, ou Modelo Consensual, para o projeto sistemático de produtos conforme Figura 2.2.



Figura 2.2 - Modelo Consensual para o projeto sistemático de produtos adaptado de OGLIARI, 1999, pg 27.

Definido o problema de projeto, de acordo com a Figura 2.2, o projeto de produtos inicia com as informações de mercado. Incluem-se, nesse escopo, os interesses ou as manifestações dos clientes de projeto, ou seja, daquelas pessoas ou organizações que se relacionam, direta ou indiretamente, com o projeto em questão (*Stakeholders*). Tais informações, geralmente genéricas e qualitativas, são transformadas em especificações de projeto, ou seja, em requisitos quantificados, que estabelecem os principais problemas técnicos a serem resolvidos e as restrições de solução. Esse processo é denominado, segundo Fonseca (2000) de projeto informacional do produto. O modelo de produto obtido ao final dessa fase são as **especificações de projeto**, que é uma lista de objetivos que o produto a ser projetado deve atender. Dentro do processo de projeto a especificação tem duas funções (Roozenburg & Eekels, 1995): direcionar o processo de geração de soluções e fornecer as bases para os critérios de avaliação.

Na fase que se segue, desenvolve-se o projeto conceitual do produto, ou seja, o estabelecimento da concepção que melhor satisfaz às especificações de projeto. Essa concepção, de natureza qualitativa, representa o produto em suas principais funcionalidades e princípios de solução sendo caracterizada através de esquemas ou esboços da solução desenvolvida. Esta fase inicia através de um estudo compreensivo do problema num plano abstrato, de forma a abrir caminho para soluções melhores. A formulação do problema é feita de forma ainda abstrata, através das funções que o produto deve realizar, independente de qualquer solução particular. O

ponto de partida é a abstração feita na etapa anterior, que permite o estabelecimento criterioso da função global do sistema, e o resultado, ao final da etapa, é a estrutura de funções. A subdivisão da função global visa facilitar a busca por princípios de solução onde passa-se do abstrato ao concreto, da função à forma.

Partindo-se da idéia de que diversas estruturas funcionais deveriam ser geradas, é necessário estabelecer os critérios de escolha para selecionar a melhor alternativa. A dificuldade principal é estabelecer critérios de solução objetivos para um modelo de produto ainda muito abstrato. As especificações de projeto, segundo Back & Forcellini (1997), continuam a ser o critério principal. No entanto, faz-se necessário *imaginar* princípios de solução para poder confrontar as estruturas alternativas, pois posteriormente, a cada uma das subfunções da estrutura funcional selecionada deverá ser atribuído um princípio de solução. As últimas etapas desta fase compreendem a combinação de princípios de solução de modo a formar concepções alternativas e posteriormente avaliá-las.

Com o emprego da matriz morfológica são estabelecidas combinações de princípios de solução entre as subfunções da estrutura funcional (linhas da matriz). Como cada uma das linhas pode apresentar inúmeros princípios de solução, gera-se, rapidamente, um grande número de soluções alternativas, o que pode tornar a etapa de seleção bastante difícil. Portanto, é necessário limitar o número de combinações. Pahl & Beitz (1996) sugerem a aplicação de três critérios para esse fim: (a) somente combinar subfunções com princípios de solução compatíveis; (b) somente procurar por soluções que atendam a especificação de projeto e às restrições de orçamento e; (c) concentrar em combinações promissoras estabelecendo as razões de tal preferência. Roozenburg & Eekels (1995) sugerem a realização de uma análise das colunas da matriz morfológica de forma a posicionar nas primeiras os princípios de solução mais adequados para a subfunção. O ordenamento é feito com base na parte da especificação do projeto referente à subfunção em questão. Com essa técnica o número de combinações é reduzido, pois as células com princípios de solução pouco adequados não são consideradas.

A profusão de soluções alternativas geradas constitui-se ao mesmo tempo, segundo Pahl & Beitz (1996), no ponto forte (grande número de soluções consideradas) e no ponto fraco (dificuldade de apreciar todas as soluções) da abordagem sistemática nessa etapa do projeto conceitual. Para tentar superar essa contradição, minimizando o risco de eliminar uma solução promissora, deve-se empregar métodos sistemáticos de seleção que se adaptem à pequena quantidade de informações disponíveis nessa etapa. Ullman (1992) e Pugh (1991) estabelecem procedimentos para reduzir as variantes geradas a umas poucas, mas promissoras. O

modelo de produto obtido ao final dessa fase é a **concepção do produto**, que, segundo Pahl & Beitz (1996), é a proposta de solução fundamental, que satisfaz a função global e que sustenta a promessa de realização da tarefa.

Sobre a melhor concepção desenvolvem-se processos para configurar o **leiaute do produto**. Essa é a fase do processo de projeto na qual, partindo da concepção de um produto, o projeto é desenvolvido de acordo com critérios técnicos e econômicos e à luz de informações adicionais, até o ponto em que o projeto detalhado subsequente possa conduzir diretamente à produção. Nessa fase do projeto preliminar o modelo do produto evolui da concepção ao leiaute definitivo do produto. As ferramentas empregadas nessa fase do projeto são aquelas comuns na área de engenharia como: CAD, programas de simulação, construção de modelos, programas de auxílio ao cálculo do dimensionamento das peças, entre outros. Pahl & Beitz (1996) propõem o emprego de *checklists* e estabelecem princípios a serem observados (princípios de transmissão de força, divisão de tarefas, etc) e critérios para atender necessidades específicas (projeto para X - DFX). Porém, acima de tudo afirmam que deve-se observar as regras básicas de **clareza, simplicidade e segurança**.

Por último, desenvolvem-se processos para transformar o leiaute do produto em documentos que caracterizam detalhadamente as soluções desenvolvidas e que possibilitam a sua realização física. A forma, as dimensões e as tolerâncias de todos os componentes devem ser finalmente fixadas. Da mesma forma a especificação dos materiais e a viabilidade técnica e econômica devem ser reavaliadas. O modelo de produto é expresso pela documentação completa necessária à produção do produto projetado. Nessa fase são empregadas uma série de normas e procedimentos padronizados, conforme as necessidades dos meios de fabricação. Trata-se da **documentação final do produto** obtida sob o projeto detalhado do mesmo.

2.5 - O processo de tomada de decisões na fase de projeto conceitual

A fase de projeto conceitual é considerada como a fase mais importante no processo de projeto de um produto, pois as decisões tomadas nessa fase influenciam sobremaneira os resultados das fases subsequentes (Back & Forcellini, 1997), justificando assim a limitação do escopo deste trabalho à fase de projeto conceitual.

Através de uma análise das principais atividades pertinentes a esta fase, foram resumidas na Tabela 2.1 as decisões a serem tomadas e os critérios fornecidos pelas abordagens representativas ao Modelo Consensual.

Pode-se observar que os critérios para tomada de decisões são estabelecidos na forma de simples orientações e/ou métodos.

Tabela 2.1 - Principais tarefas e as decisões da fase de projeto conceitual

Principais tarefas do Projeto Conceitual	Decisão envolvida	Métodos / Orientações
Estabelecer a estrutura funcional	Seleção da estrutura funcional	<ul style="list-style-type: none"> - Atendimento as especificações de projeto - Método FAST (Csillag, 1985) - Método IDEF0 (NIST, 1993)
Gerar/pesquisar princípios de solução	-	<ul style="list-style-type: none"> - TRIZ, Brainstorming, Galeria,... (Sozo et al, 2000)
Combinar os princípios de solução	Seleção de cada princípios de solução	<ul style="list-style-type: none"> - Combinar subfunções com princípios de solução compatíveis - Atendimento as especificações de projeto - Concentrar-se em combinações promissoras - Priorizar princípios de solução mais adequados - ...
Selecionar concepções alternativas	Seleção da concepção	<ul style="list-style-type: none"> - Método de Ullman (Ullman, 1992) - Método de Pugh (Pugh, 1991)

As orientações refletem esforços sistemáticos com o objetivo de guiar a equipe de projeto em determinada direção e, na grande maioria, assumem como meta a satisfação das especificações de projeto.

Na literatura têm sido propostos vários métodos levando-se em conta as informações de natureza qualitativa, limitadas e abstratas desta fase de projeto.

Em um artigo de revisão Sozo et al (2000) descreve os principais métodos de criatividade e, através de suas peculiaridades, sugerem indicações de qual ou quais métodos utilizar durante as etapas de projeto. O método TRIZ, por exemplo, traduzido como Teoria da

Solução Inventiva de Problemas, inicia com a identificação dos requisitos de projeto conflitantes a serem otimizados. Após associam-se esses requisitos em contradição com os parâmetros de engenharia da TRIZ. Os parâmetros de engenharia, que totalizam trinta e nove, correspondem às grandezas envolvidas em problemas técnicos de diferentes áreas. Conforme o tipo de problema, estas grandezas devem ser maximizadas, minimizadas ou otimizadas. Existem trinta e nove parâmetros de engenharia. Realizada a associação, identificam-se os princípios inventivos da TRIZ, utilizando a matriz de contradição. Relacionam-se os requisitos analisados com a estrutura de funções e gera-se então as alternativas de concepção do produto para tais funções, com base nos princípios inventivos indicados na matriz de contradição.

O Método FAST, *Functional Analysis System Technique* abordado por Csillag (1985) entre outros, apresenta-se como uma proposição sistemáticas para o desenvolvimento da estrutura de funções, visando relacionar os requisitos com funções básicas ou elementares. O Método IDEF0 desenvolvido pelo NIST - *National Institute of Standards and Technology* fornece meios para modelar de maneira completa e consistente a estrutura funcional, considerado como uma normalização do processo de modelagem de funções. (NIST, 1993)

Para a seleção de concepções alternativas, Ullman (1992), por exemplo, propõe que as concepções do produto sejam avaliadas sob o julgamento da viabilidade (baseado na experiência dos projetistas), disponibilidade tecnológica (baseada no estado da técnica), exame “passa/não passa” (baseado na comparação das características de cada concepção do produto contra as necessidades de projeto: “passa/não passa”) e através da matriz de decisão ou método de Pugh (baseado na obtenção de escores para cada concepção do produto, que são comparados com as necessidades de projeto). Tal método é ilustrado através da Figura 2.3. Outros métodos de avaliação são descritos em Pahl & Beitz (1996) e Back (1993), considerando o confronto das características de cada concepção alternativa contra determinados critérios de avaliação (geralmente os requisitos de projeto).

Assim, percebe-se a existência de um grande número de decisões a serem tomadas na fase de projeto conceitual. Porém, devido à limitação de escopo deste trabalho e, com base na afirmação de Pahl & Beitz (1996), salientando que a profusão de soluções alternativas geradas constitui-se ao mesmo tempo no ponto forte (grande número de soluções consideradas) e no ponto fraco (dificuldade de apreciar todas as soluções) da abordagem sistemática, serão analisadas as decisões pertinentes à seleção de concepções alternativas, visando o desenvolvimento de métodos sistemáticos de seleção que se adaptem à pequena quantidade de informações disponíveis nessa etapa.

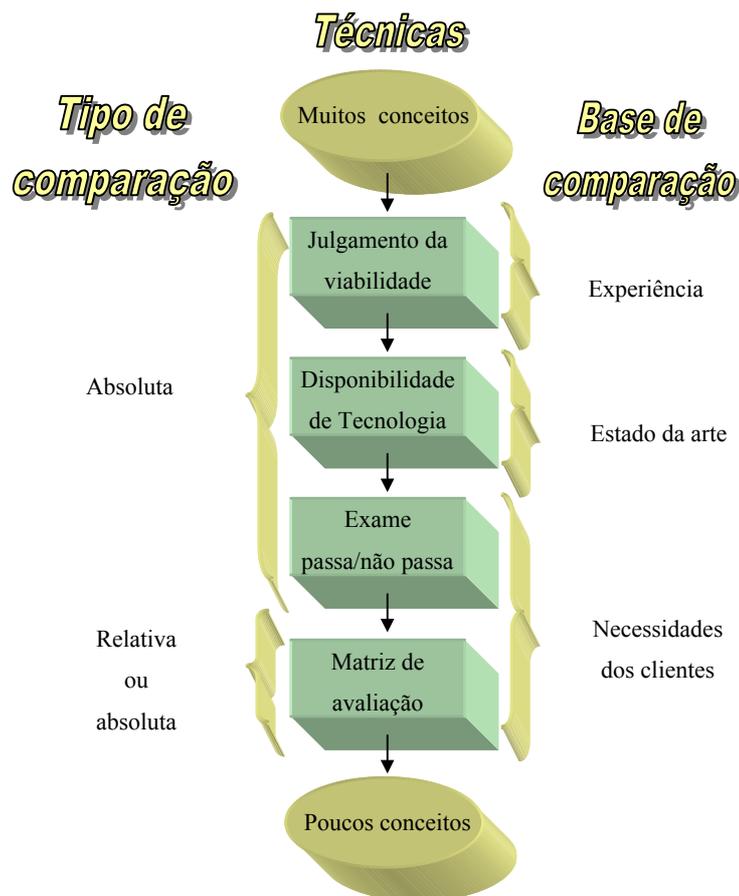


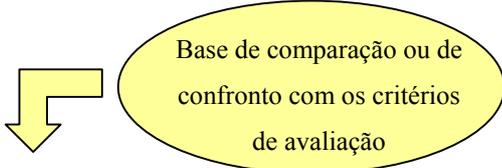
Figura 2.3 - Quatro técnicas de avaliação propostas por Ullman (1992).

2.6 - Análise crítica do processo de tomada de decisões envolvendo a seleção de concepções alternativas

Nas abordagens mencionadas anteriormente não fica muito claro quais são os critérios ou orientações a serem seguidas na seleção de concepções alternativas.

Nas propostas de Pahl & Beitz (1996) e Back (1993), sob o método da matriz de avaliação ilustrado pela Figura 2.4, alguns dos critérios de decisão refletem as próprias características das concepções.

Embora se configurem critérios de avaliação para confrontar as soluções geradas, estas características são consideradas sob um nível de informação que nem sempre é possível estabelecer na fase de concepção do produto, sendo assim características mais apropriadas para avaliação na fase do projeto preliminar do produto.



Critérios de Avaliação	Peso (p_i)	Parâmetros (k_{ij})	Solução 1			Solução 2		
			K_{i1}	V_{i1}	$p_i v_{i1}$	K_{i1}	V_{i1}	$p_i v_{i1}$
Pequeno consumo de combustível	0,3	Consumo de combustível (g/kwh)	240	3	0,9	300	2	0,6
Baixo Peso	0,15	Relação peso/potência (kg/kw)	1,7	4	0,6	2,7	2	0,3
Fácil Fabricação	0,10	Facilidade de fundição das peças (-)	Regular	1	0,10	Bom	2	0,2
Vida longa	0,20	Vida (km)	80.000	2	0,4	150.000	3	0,6
etc.	p_n	-	-	-	-	-	-	-
	$\sum p_i v_{ij}$	-	-	-	$\sum p_i v_{i1}$	-	-	$\sum p_i v_{i2}$

Figura 2.4 - Exemplo de uma matriz de avaliação, adaptado de Back (1993).

Na matriz de decisão conforme Ullman (1992), os critérios de avaliação apresentam-se na forma de orientações gerais, não considerando as características peculiares das soluções sendo avaliadas. A Figura 2.5 ilustra um exemplo desta afirmação. Segundo Ogliari (1999) as características das soluções sendo avaliadas neste caso, não são explícitas. Será o número de elementos da solução? Serão os tipos de elementos? Ou serão os princípios de funcionamento das soluções? Estas características dependem, em parte, do entendimento ou da percepção do projetista sobre cada uma das soluções propostas.

Desta forma, como as soluções são de diferentes naturezas e não existe uma “base de comparação” explícita e comum, muitas características poderão ser desconsideradas no processo de avaliação.

2.7 - Considerações finais

Neste capítulo foram descritos alguns aspectos históricos do processo de projeto, visando propiciar um melhor entendimento ao leitor ao longo deste trabalho. Foram mencionadas também algumas definições e o Modelo Consensual do processo de projetos, sintetizando as metodologias propostas por diversos autores.

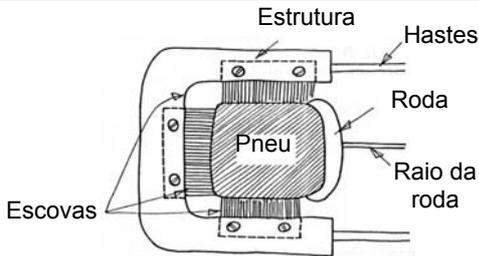
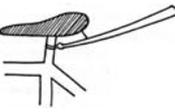
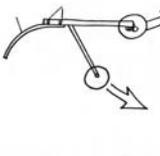
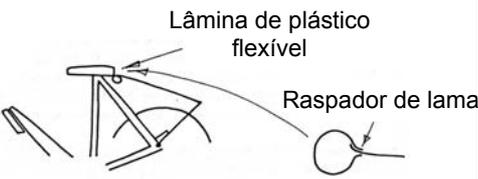
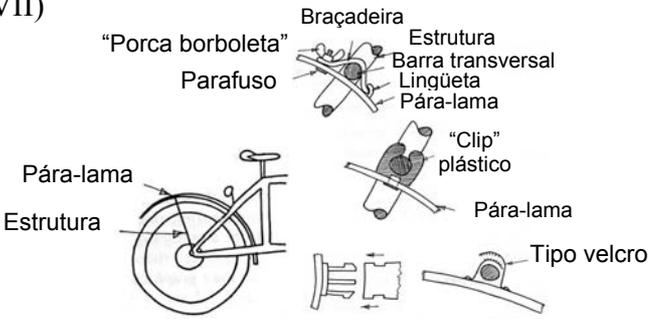
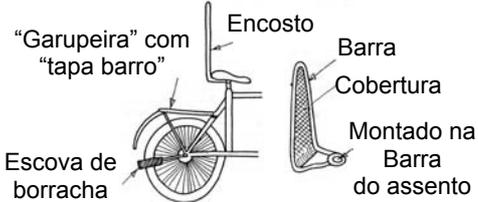
Soluções geradas									
I)	Capa de chuva disposta sobre a roda com um mínimo reforço		V)						
II)	Dispositivo laminar montado no assento		VI)	"Tapa barro" de  "Usar um método de fixação da garupeira" 					
III)		Lâmina de plástico flexível Raspador de lama	VII)						
IV)		"Garupeira" com "tapa barro" Encosto Barra Cobertura Montado na Barra do assento Escova de borracha							
Matriz de Decisão									
Critérios	Peso	Soluções							
Fácil de montar	7	I	II	III	IV	V	VI	VII	
Fácil de desmontar	4	+	+	+	+	+	=	Referência	
Rápido para montar	3	-	+	+	+	+	=		
Rápido para desmontar	1	+	+	+	+	+	=		
Etc.									
Legenda	+ : melhor ; (-): pior; (=): igual à referência								

Figura 2.5 - Exemplo parcial de uma matriz de decisão, adaptado de Ullman (1992), *apud* Ogliari (1999).

Através de uma análise crítica do processo de tomada de decisões envolvendo a seleção de concepções alternativas, pode-se observar que os diferentes métodos existentes na literatura primam pela clareza e simplicidade do projeto e, na maioria dos casos apresentam como critério as especificações de projeto que, logicamente irão diferenciar-se de projeto para projeto.

Conclui-se então que existem critérios e orientações a serem seguidos no processo de tomada de decisões. Porém estes são muitas vezes dependentes do domínio em questão

porque inexistem um conjunto de especificações de projeto que possa ser usado de modo geral para todas as áreas de projeto.

Visando sanar esta deficiência, será realizado um estudo envolvendo a abordagem axiomática, pois os axiomas de projeto fornecidos por tal abordagem provêm meios para auxiliar o processo de tomada de decisões. Assim, através da abordagem axiomática de projetos, pretende-se introduzir critérios de modo que possam ser utilizados nas diversas áreas de projeto.

3 - A ABORDAGEM AXIOMÁTICA

*“Se existe uma forma de fazer
melhor, descubra-a.”
(Thomas Edison)*

3.1 - Introdução

Através de uma análise crítica das metodologias abordadas na literatura, expressas através do Modelo Consensual, resumiram-se as principais tarefas e as decisões da fase de projeto conceitual de produtos. Verificou-se que os critérios fornecidos para o processo de tomada de decisões são muitas vezes dependentes do domínio em questão e, desta forma, devem ser restabelecidos a cada projeto. Neste sentido, este capítulo tem o propósito de estudar a abordagem axiomática visando a sua utilização no processo de tomada de decisões, uma vez que os axiomas de projeto são considerados como medidas da qualidade do projeto e podem ser usados como critérios no processo de tomada de decisões, sem a necessidade de redefinição a cada novo projeto.

Assim, primeiramente realiza-se uma introdução à abordagem axiomática de projetos, relatando sua evolução. São definidos os principais conceitos, como: Domínios, Hierarquias, “Ziguezague” e Axiomas de projeto. Também define-se a matriz de projeto, a qual descreve as relações existentes entre os diferentes domínios da abordagem axiomática. Posteriormente são descritas as tarefas a serem realizadas no processo de projeto segundo a abordagem axiomática e suas equivalências com o Modelo Consensual. Por último, são relatadas algumas pesquisas ilustrando suas contribuições e até mesmo críticas por parte de alguns autores à abordagem axiomática de projetos.

3.2 - Histórico

A abordagem axiomática de projetos tem início com a premissa de que existem princípios generalizáveis que governam o comportamento intrínseco do processo de projeto. Os

axiomas são princípios gerais ou verdades evidentes, que não podem ser deduzidas ou mesmo provadas verdadeiras, exceto pelo fato de não existirem contra-exemplos ou exceções. A abordagem axiomática tem apresentado um impacto profundo em diversos campos da ciência e da tecnologia. Os axiomas da geometria Euclidiana ainda formam a base para o projeto geométrico (entre outras coisas); as leis de Newton constituíam axiomas quando ele as enunciou e a primeira e a segunda leis da termodinâmica são axiomas. Baseados nestes axiomas, os conceitos de energia, entropia e força foram definidos. Uma das muitas razões para se buscar uma abordagem axiomática para o projeto é a generalidade (*generalizability*) dos axiomas. (Suh, 1995).

As pesquisas em projeto axiomático foram iniciadas em 1977, pelo professor *Nam P. Suh*, do *MIT - Massachusetts Institute of Technology*. Segundo o pesquisador, as pesquisas iniciaram devido ao objetivo de estabelecer um centro de pesquisa em manufatura e ensino. *Suh* acreditava fortemente que existiam um conjunto de princípios que determinam boas práticas de projeto e que estabelecer uma base disciplinar para projeto e manufatura, deveria ser parte dos esforços do novo centro.

O autor identificou os elementos comuns de muitos projetos realizados com sucesso nas indústrias e em universidades e então generalizou estes elementos comuns evoluindo a doze “hipotéticos” axiomas. Estes foram reduzidos a seis “hipotéticos” axiomas e seis corolários¹, originando um de seus primeiros trabalhos (Suh, Beel & Gossard, 1978) ilustrando a aplicação da abordagem axiomática a sistemas de manufatura. Através de várias análises tais axiomas foram reduzidos a dois, resultando em novas publicações: Suh et al, (1979) e Suh (1984). Dentre suas publicações mais recentes, destacam-se seus dois últimos livros, *The Principles of Design* (Suh, 1990) e *Axiomatic Design: Advances and Applications* (Suh, 2000).

3.3 - Conceitos da abordagem axiomática de projeto

A abordagem axiomática de projeto possui quatro conceitos principais que definem as atividades e regras a serem seguidas no processo de projeto:

1. Domínios
2. Hierarquias
3. “Ziguezague”

¹ Corolários: são proposições originadas dos axiomas ou de outras proposições já provadas. (Suh, 1990)

4. Axiomas de projeto

3.3.1 - Domínios

Durante o processo de projeto o produto que está sendo considerado pode ser relacionado a quatro domínios: domínio usuário, domínio funcional, domínio físico e domínio processo, conforme ilustrado na Figura 3.1.

O número de domínios permanece constante, mas a natureza dos elementos de projeto em cada domínio muda, dependendo do campo do problema. (Gebala & Suh, 1992).

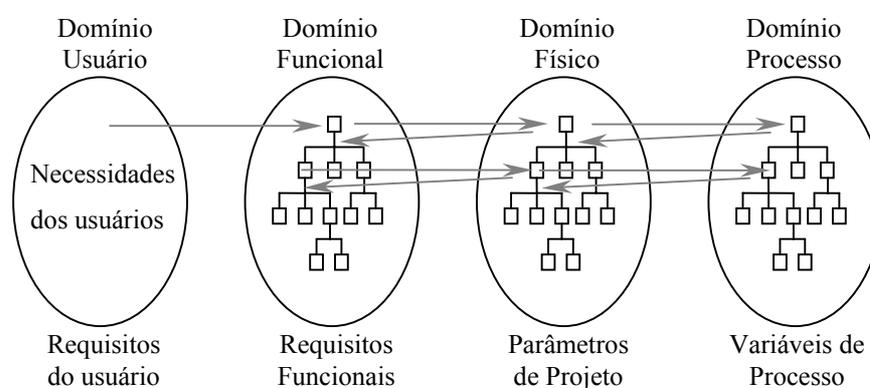


Figura 3.1 – Os quatro domínios do projeto axiomático e seus elementos.

Para cada par de domínios adjacentes, o domínio à esquerda representa “o que deseja-se atingir” e o da direita representa a solução do projeto indicando “como pretende-se satisfazer os requisitos especificados no domínio da esquerda”. Para auxiliar a equipe de projeto a sair do "quê" para o "como", a abordagem axiomática estabelece um mapeamento entre os domínios. Este mapeamento revela as **relações de dependência** no processo de mudança entre domínios e são representadas pelas matrizes de projeto¹. Porém, conforme Harutunian et al (1996), apenas as relações entre os domínios Usuário e Funcional não podem ser representados pela matriz de projeto por não se apresentam estritamente organizadas.

Associado a cada domínio estão os elementos de projeto que cada um contém, conforme ilustra a Tabela 3.1. Por motivos de simplificação do texto serão utilizadas abreviações para se referir aos elementos de cada domínio, porém traduzidos para a língua portuguesa de maneira a proporcionar maior clareza ao leitor, e sendo assim utilizados no decorrer deste trabalho.

¹ Conceito detalhado no item 3.4.

Tabela 3.1 – Elementos de projeto de cada domínio.

Domínio	Elemento
Usuário	Requisito do usuário (RU)
Funcional	Requisito funcional (RF)
Físico	Parâmetro de projeto (PP)
Processo	Variável de processo (VP)

Os Requisitos do Usuário (RUs) expressam as necessidades e expectativas dos usuários ao longo de todo o ciclo de vida do produto. Em geral tais necessidades não são mensuráveis e servirão de base para o estabelecimento do conjunto de requisitos funcionais, os quais irão descrever o problema de projeto. Os Requisitos Funcionais (RFs) são definidos como o mínimo, não único conjunto de requisitos independentes que caracterizam por completo os objetivos do projeto para uma determinada necessidade (Magrab, 1997). Em outras palavras, os RFs representam quais ações ou conjunto de ações que o produto deverá realizar para satisfazer as necessidades dos usuários, e estarão sujeitos a restrições que irão fornecer limites aceitáveis para o projeto. Os Parâmetros de Projeto (PPs) são os elementos da solução de projeto no domínio físico, escolhidos para satisfazer os requisitos funcionais especificados, sendo estabelecidos de forma independente da solução. As Variáveis de Processo (VPs) são os elementos no domínio processo que caracterizam o processo que satisfaz os Parâmetros de Projeto especificados, sendo também estabelecidas de forma independente da solução

A Tabela 3.2 mostra que tarefas de projeto aparentemente diferentes podem ser descritas em termos dos quatro domínios de projeto. Como exemplo, considera-se a área de ciência dos materiais onde o objetivo seja desenvolver materiais com determinadas propriedades (RFs). Isto é realizado através do projeto de microestruturas (PPs) para satisfazer estes RFs e o desenvolvimento de métodos de processamento de materiais (VPs) para criar a microestrutura desejada. No caso do projeto de produtos, o domínio dos requisitos de projeto contém os requisitos do consumidor ou atributos pelos quais o consumidor está procurando; o domínio funcional consiste de requisitos funcionais, freqüentemente definidos como especificações de engenharia e restrições; o domínio físico é o domínio no qual os parâmetros de projeto (PPs) são escolhidos de forma a satisfazer os RFs; e o domínio do processo especifica os métodos de manufatura que poderão produzir os PPs.

Tabela 3.2 – Classificação de projetos de diversas áreas segundo os quatro domínios da abordagem axiomática. (Suh, 1995).

Área	Domínio Usuário	Domínio Funcional	Domínio Físico	Domínio Processo
Produtos	Atributos desejados pelos consumidores	Requisitos funcionais especificados para o produto	Variáveis físicas que podem satisfazer aos requisitos funcionais	Variáveis de processo que podem controlar parâmetros de projeto (PPs)
Materiais	Desempenho desejado	Propriedades requeridas	Microestrutura	Processos
<i>Software</i>	Atributos desejados do <i>software</i>	Saída	Variáveis de entrada e algoritmos	Subrotinas
Sistemas	Atributos desejados do sistema como um todo	Requisitos funcionais para o sistema	Máquinas ou componentes, subcomponentes	Recursos (humanos, financeiros, materiais, etc)

3.3.2 - Hierarquia

O conceito de hierarquia é utilizado para descrever o processo de decompor o produto de um determinado nível de abstração para níveis com maior detalhamento (de sistemas para subsistemas; de montagens, para peças). A hierarquia existe para qualquer produto nos domínios funcional, físico e processo, e representa a arquitetura do produto (Suh, 1990).

Este processo consiste em dividir um sistema em elementos mais detalhados e é descrito através da Figura 3.2. No caso do domínio funcional, o nível mais elevado, representa a função global do sistema, análogo ao método da síntese funcional utilizado pelo Modelo Consensual de projetos.

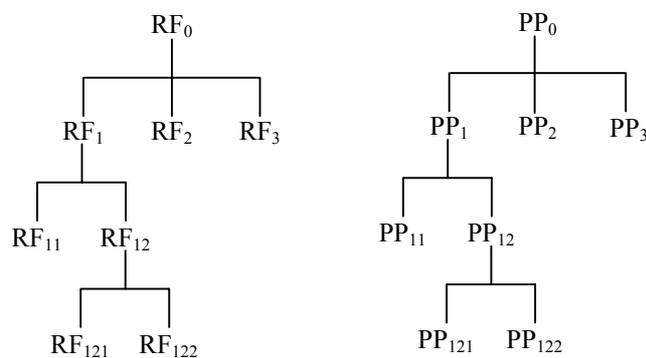


Figura 3.2 – Exemplo de hierarquia de projeto.

Na abordagem axiomática os objetivos do projeto são estabelecidos no domínio funcional enquanto que a solução é estabelecida no domínio físico. O projeto então, envolve interligar estes dois domínios para cada nível hierárquico. (Suh, 1990)

3.3.3 - “Ziguezague”

O terceiro conceito da abordagem axiomática descreve o processo de mudanças entre os pares de domínios ao longo da decomposição do objeto de projeto. Ou seja, a equipe de projeto executa um processo em que realiza um ziguezague entre os domínios, decompondo o problema de projeto. Em dado nível do objeto de projeto, por exemplo, existe um determinado conjunto de RFs. Antes que estes RFs possam ser decompostos os correspondentes PPs devem ser selecionados. Uma vez que um RF seja satisfeito por seu correspondente PP, este RF pode ser decomposto em um conjunto de subrequisitos funcionais e, o processo é repetido. Este processo é ilustrado na Figura 3.3 e sua importância reside no fato de que as decisões tomadas em níveis elevados afetam os níveis inferiores. Se os RFs forem alterados, então a solução muda, ou seja, uma nova solução deve ser encontrada. Desta forma, o projeto envolve uma contínua interação entre o que se quer atingir e como se quer atingi-la.

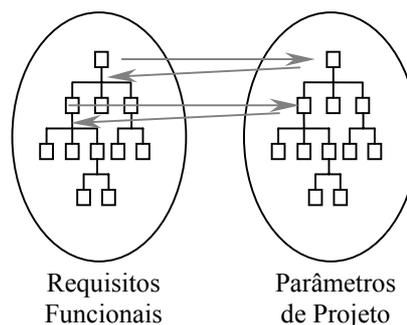


Figura 3.3 – Exemplo de ziguezague.

3.3.4 - Axiomas de projeto

Projeto pode ser formalmente definido como a criação de soluções, sintetizadas em forma de produtos, processos ou sistemas que satisfaçam as necessidades dos usuários. No caso da abordagem axiomática, isto é realizado por meio da seleção apropriada dos PPs que satisfaçam os RFs. Tal seleção é realizada com base no mapeamento entre os RFs no domínio funcional e os PPs no domínio físico (Suh, 1990). Este mapeamento não é único e, desta forma, várias alternativas podem ser elaboradas. Os axiomas de projeto fornecem os critérios que este mapeamento deve satisfazer para produzir um “bom” projeto e fornecendo uma base de comparação e seleção para o projeto.

O primeiro axioma é o **axioma da independência**: “Manter a independência dos Requisitos Funcionais”. Em um projeto aceitável, os PPs e os RFs são relacionados de tal forma que um determinado PP pode ser ajustado para satisfazer seu correspondente RF, sem afetar os demais (Suh, 1990). Desta forma, soluções ótimas podem ser obtidas, não limitando-se a soluções de compromisso¹.

Como exemplo, considera-se uma simples torneira conforme ilustrado pela Figura 3.4, onde o problema de projeto é estabelecido na forma de RFs: obter determinado fluxo de água em uma temperatura específica. Sendo a torneira alimentada por água quente e fria são estabelecidos como PPs: meios para controlar o fluxo de água quente e o fluxo de água fria.



RF_1 = Obter fluxo de água fria

RF_2 = Obter temperatura da água

PP_1 = Registro para ajustar água fria

PP_2 = Registro para ajustar água quente

Figura 3.4 – Exemplo violando o primeiro axioma de projeto.

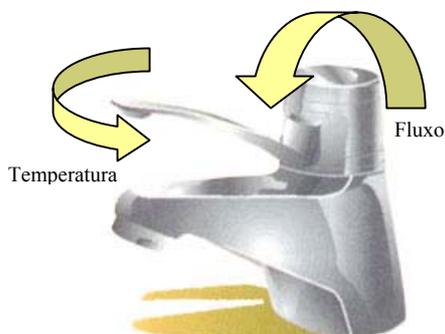
Para se obter um determinado fluxo e temperatura através dos PPs ilustrados na Figura 3.4, deve-se ajustar simultaneamente a água fria e a água quente, ou seja, a solução apresenta-se como um sistema vinculado, pois uma alteração no fluxo de água irá interferir na temperatura. Esta solução viola o primeiro axioma, pois os PPs e os RFs são relacionados de tal forma que um determinado PP quando ajustado para satisfazer seu correspondente RF, irá afetar os demais RFs.

Porém, mantendo-se os mesmos RFs e alterando os PPs conforme ilustrado na Figura 3.5, torna-se possível controlar a temperatura da água sem interferir no fluxo, respeitando o primeiro axioma. Esta solução apresenta-se como um sistema não vinculado, pois a alteração em um determinado PP para satisfazer seu correspondente RF não irá afetar os demais RFs.

Projetos que não satisfaçam o axioma da independência são chamados vinculados. Nestes é impossível ajustar um determinado PP sem afetar no mínimo dois RFs. Projetos que satisfaçam o primeiro axioma são chamados não vinculados ou semivinculados. A diferença é que em um projeto não vinculado os PPs são totalmente independentes, enquanto que no projeto semivinculado, no mínimo um PP afeta dois ou mais RFs. Desta forma, a ordem de ajuste dos

¹ Solução de compromisso: aquela onde a melhoria de um requisito, visando resolver um problema de projeto, ocasiona problemas com os outros requisitos, verificando-se a existência de conflito entre os mesmos.

PPs em um projeto semivinculado é importante. Tais diferenças são ilustradas com maiores detalhes e exemplificadas no item 3.4, juntamente com a definição da matriz de projeto.



RF₁ = Obter fluxo de água fria
RF₂ = Obter temperatura da água

PP₁ = Dispositivo para controlar o fluxo de água
PP₂ = Dispositivo para controlar a temperatura da água

Figura 3.5 – Exemplo respeitando o primeiro axioma de projeto.

O segundo é o **axioma da informação**: “Minimizar o conteúdo de informações”. Entre todos os projetos que satisfaçam o primeiro axioma, aquele com menor conteúdo de informação é o melhor (Suh, 1900). Desta forma, projetos que minimizam o número de requisitos funcionais e restrições, apresentem partes integradas preservando sua independência funcional, utilizem componentes padronizados e intercambiáveis e apresentem simetria tanto quanto possível, resultarão em projetos que possuem um conteúdo de informações reduzidas, o que significa uma maior probabilidade de sucesso.

Como exemplo, considera-se uma peça na forma cilíndrica com comprimento L . Aceitando as dimensões e tolerâncias da seção transversal, somente é necessário fornecer a dimensão L . Do contrário, se a seção transversal requerida for menor, um conteúdo maior de informações é necessário, especificando fixações e operações de usinagem. Quanto menor a quantidade de informações necessária melhor será o projeto. Considerando agora esta mesma peça em bruto cilíndrica, porém com comprimento de $0,5m \pm 1\mu m$. Uma simples trena de medição não poderia ser usada. De fato, esta simples trena poderia ser utilizada para a medição, mas a probabilidade de medir a peça na tolerância especificada será muito pequena. De forma a aumentar a probabilidade seria necessário a utilização de instrumentos com maior precisão. Assim, sugere-se a noção de que informação esteja diretamente relacionada com a probabilidade de satisfazer determinado RF.

Segundo Pugh (1990), o conceito de conteúdo de informação parece concordar com o conceito de complexidade, o qual é definido como sendo dependente do: número de componentes, do número de interconexões e interfaces, da quantidade de tipos de componentes e do número de funções que o produto deve realizar.

Cabe salientar que dependência funcional é diferente de dependência física, a qual é freqüentemente desejada como conseqüência do segundo axioma. Integração de uma ou mais funções em uma única peça, desde que seja mantida a independência das funções, freqüentemente reduz a complexidade do produto, como ilustra o exemplo da Figura 3.6. Este dispositivo permite abrir latas e garrafas e, se não existir a necessidade de realizar os RFs simultaneamente, a integração física das soluções não viola a independência dos RFs.

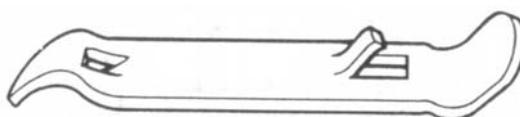


Figura 3.6 – Exemplo de abridor de latas onde mantém-se a independência dos RFs.

3.4 - Matriz de projeto

Definindo-se um vetor RF contendo os requisitos funcionais e outro vetor PP, contendo os parâmetros de projeto, projetar envolve então selecionar o apropriado conjunto de PPs de forma que a Equação (3.1) seja satisfeita.

$$\{\text{RF}\} = [\text{A}] \times \{\text{PP}\} \quad (3.1)$$

O vetor $\{\text{RF}\}$ expressa o que se deseja em termos de metas de projeto, e o produto das matrizes $[\text{A}]\{\text{PP}\}$ expressa como espera-se satisfazer os requisitos funcionais do projeto. A matriz $[\text{A}]$ é a **matriz de projeto** ilustrada pela Equação (3.2):

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2n} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ A_{n1} & A_{n2} & \dots & A_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Os elementos da matriz projeto A_{ij} podem assumir duas formas: valores numéricos ou letras. A representação na forma de letras é utilizada para simplesmente indicar um relacionamento de dependência entre os RFs e os PPs, mas a relação específica não é de interesse. Um “X” expressa a existência de um relacionamento. Um “0” indica que não existe relacionamento. Na forma de valores numéricos, a matriz de projeto pode assumir também

relações descritas por equações ou simplesmente números que modelam matematicamente os relacionamentos físicos.

Como já mencionado anteriormente, a matriz de projeto ilustra as relações existentes entre os diferentes domínios da abordagem axiomática. Porém, neste trabalho quando se fizer referência à matriz de projeto, serão consideradas apenas as relações existentes entre funções e soluções, devido à limitação do escopo à fase de projeto conceitual de produtos. Desta forma, a matriz de projeto demonstrará as relações existentes entre funções e soluções, ou seja, as relações entre RFs e PPs em um dado nível da hierarquia do projeto.

Na abordagem axiomática o tipo de relacionamento irá caracterizar a solução para o problema. A Figura 3.7 ilustra o mesmo relacionamento entre RFs e PPs, demonstrando-o através de uma equação matricial e uma representação gráfica.

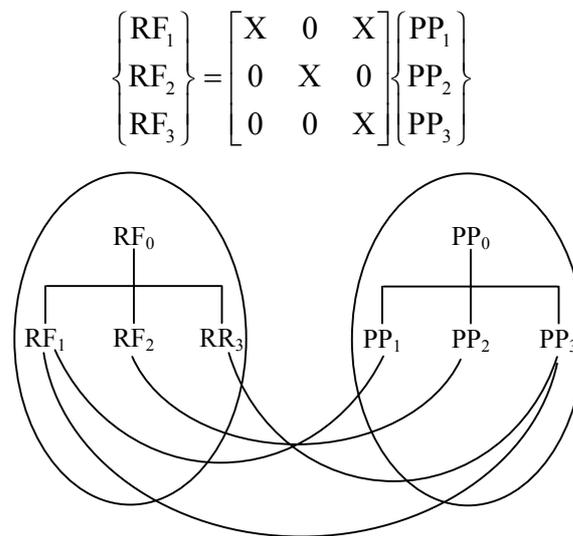


Figura 3.7 – Descrição do relacionamento entre domínios.

Existem três tipos de soluções para o problema. O primeiro tipo é aquela que satisfaz o primeiro axioma, e é obtida quando $[A]$ é uma matriz diagonal, descrito pela Equação (3.3). Esta solução é chamada solução não vinculada.

$$\begin{Bmatrix} \text{RF}_1 \\ \text{RF}_2 \\ \text{RF}_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \text{PP}_1 \\ \text{PP}_2 \\ \text{PP}_3 \end{Bmatrix} \quad (3.3)$$

O segundo tipo de solução sempre viola o primeiro axioma. Neste caso a solução é denominada vinculada e é representada pela Equação (3.4).

$$\begin{Bmatrix} \text{RF}_1 \\ \text{RF}_2 \\ \text{RF}_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \text{PP}_1 \\ \text{PP}_2 \\ \text{PP}_3 \end{Bmatrix} \quad (3.4)$$

O terceiro tipo é denominado semivinculado e é representado pela Equação (3.5). Aqui, a independência dos RFs pode ser assegurada se os PPs estiverem dispostos na matriz de projeto de modo que constituam uma matriz triangular¹. Neste caso, a violação ou não do primeiro axioma depende da ordem de alteração dos PPs. A representação gráfica para estes três tipos de solução é ilustrada na Figura 3.8.

$$\begin{Bmatrix} \text{RF}_1 \\ \text{RF}_2 \\ \text{RF}_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \text{PP}_1 \\ \text{PP}_2 \\ \text{PP}_3 \end{Bmatrix} \quad (3.5)$$

Outra forma de analisar os relacionamentos entre RFs e PPs é seguir em sentido oposto ao indicado pelas setas na Figura 3.8. Desta forma, identifica-se quais requisitos funcionais serão afetados, quando um PP seja alterado. Por exemplo, na solução descrita como semivinculada, uma alteração no PP₂ afetará os RF₂ e RF₃.

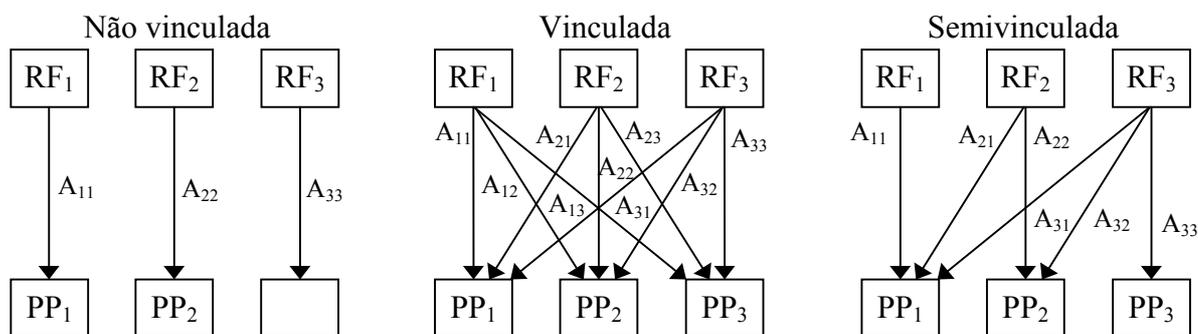


Figura 3.8 – Representação gráfica da matriz de projeto para as três soluções possíveis.

Também faz-se necessário discutir algumas implicações oriundas da matriz de projeto quando esta não se apresentar na forma de uma matriz quadrada. Isto irá ocorrer quando o número de RFs for diferente do número de PPs, existindo duas possibilidades: um maior número de RFs ou um maior número de PPs.

¹ Matriz Triangular: é a matriz quadrada onde todos os elementos acima ou a baixo da diagonal principal ou secundária são todos iguais a 0 (zero).

Quando o projeto for caracterizado por uma maior quantidade de RFs do que PPs este será caracterizado como um projeto vinculado ou um projeto onde os RFs não poderão ser satisfeitos. Tal situação é representada pela Equação (3.6), ilustrada na forma de matrizes e equações.

$$\begin{cases} RF_1 \\ RF_2 \\ RF_3 \end{cases} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \\ A_{31} & A_{32} \end{bmatrix} \begin{cases} PP_1 \\ PP_2 \end{cases} = \begin{cases} RF_1 = A_{11}PP_1 + A_{12}PP_2 \\ RF_2 = A_{21}PP_1 + A_{22}PP_2 \\ RF_3 = A_{31}PP_1 + A_{32}PP_2 \end{cases} \quad (3.6)$$

Supondo que os todos os elementos da matriz de projeto de (3.6) sejam nulos, à exceção de A_{11} e A_{22} , não seria possível satisfazer o RF_3 alterando-se PP_1 e PP_2 . Por outro lado, se A_{31} ou A_{32} forem diferentes de zero a independência dos RFs será comprometida. Tais considerações justificam as afirmações descritas anteriormente, ou seja, quando o número de RFs for superior ao número de PPs, o projeto será caracterizado como um projeto vinculado ou um projeto onde os RFs não poderão ser satisfeitos.

Quando o projeto for caracterizado por uma maior quantidade de PPs do que RFs este poderá ser caracterizado como um projeto não vinculado, vinculado ou um projeto redundante. Tal situação é representada pela Equação (3.7), ilustrada na forma de matrizes e equações.

$$\begin{cases} RF_1 \\ RF_2 \end{cases} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \end{bmatrix} \begin{cases} PP_1 \\ PP_2 \\ PP_3 \end{cases} = \begin{cases} RF_1 = A_{11}PP_1 + A_{12}PP_2 + A_{13}PP_3 \\ RF_2 = A_{21}PP_1 + A_{22}PP_2 + A_{23}PP_3 \end{cases} \quad (3.7)$$

Visando justificar tais afirmações, assume-se primeiramente que todos os elementos da matriz de projeto de (3.7) sejam nulos, à exceção de A_{11} e A_{22} . Neste caso, o projeto será caracterizado como não vinculado e o PP_3 não apresentará nenhuma influência no projeto. Por outro lado, se $A_{12} = A_{21} = A_{23} = 0$, então o projeto será redundante, pois mesmo que mantenha a independência funcional devido aos PPs que afetam o RF_1 não afetarem o RF_2 , o RF_1 será controlado por dois PPs, PP_1 e PP_3 , existindo interações de mais de um PP sobre um único RF. Ou seja, em um projeto ideal o número de PPs deve ser igual ao número de RFs.

Visando facilitar o entendimento das possíveis soluções de projeto descritas pelas matrizes de projeto, será considerado como exemplo a evolução da máquina a vapor (Suh, 1995).

A máquina a vapor de *Newcomen*, inventada no século XVIII, era utilizada para retirar água contida no interior de minas, conforme ilustrado na Figura 3.9(a).

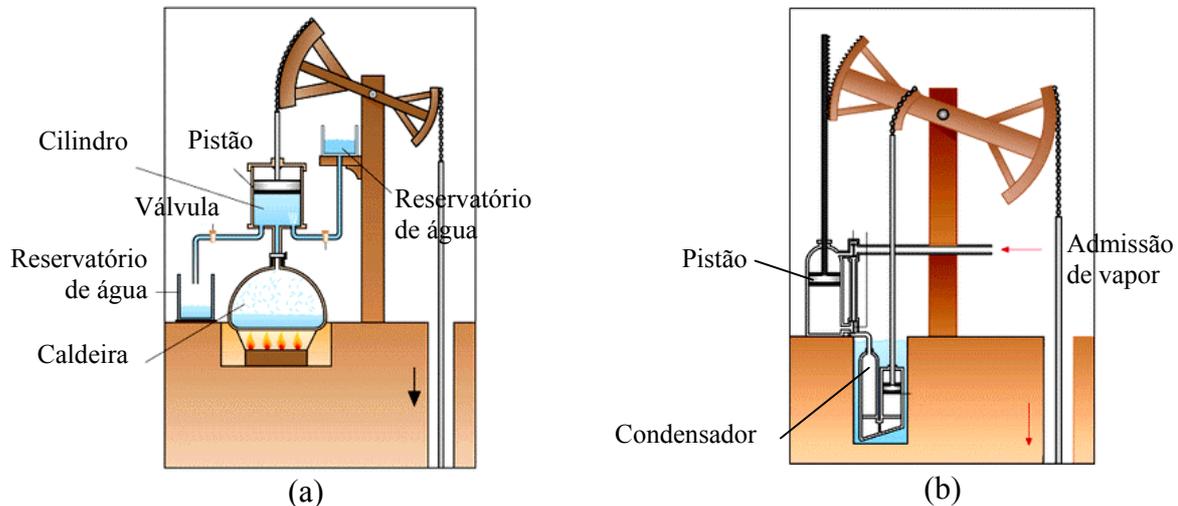


Figura 3.9 – Concepções da máquina a vapor segundo: (a) *Newcomen* e (b) *Watt*, adaptado de: Hutchinson Family Encyclopedia (2001).

A máquina operava injetando vapor no cilindro para deslocar pistão para cima e condensando o vapor de modo a criar vácuo no interior da câmara, succionando o pistão para baixo, durante o qual trabalho é realizado, retirando a água da mina.

Alguns anos mais tarde, *James Watt* realizou uma alteração no projeto da máquina de *Newcomen* obtendo uma drástica redução no consumo de carvão. A idéia de *Watt* foi introduzir um condensador separado, conforme ilustra a Figura 3.9(b), evitando a necessidade de alternar entre aquecimento e resfriamento do cilindro durante cada ciclo.

Analisando as concepções através da abordagem axiomática, verifica-se que os requisitos funcionais de ambas as máquinas são:

- RF_1 = Deslocar o pistão através da injeção de vapor;
- RF_2 = Criar vácuo no cilindro, succionando o pistão para bombear a água para fora da mina.

Os parâmetros de projeto da concepção de *Newcomen* visando satisfazer os requisitos funcionais são:

- PP_1 = Injetar vapor;
- PP_2 = Resfriar o cilindro para condensar o vapor.

O PP_1 afeta ambos RF_1 e RF_2 uma vez que o vapor aquecerá o cilindro e o pistão, os quais devem ser resfriados posteriormente e, da mesma forma, o PP_2 afeta os dois RFs pois

água fria é circulada para resfriar o cilindro e o pistão, os quais serão aquecidos novamente no próximo ciclo.

A performance da máquina de *Newcomen* é baixa, uma vez que a inércia térmica do cilindro e do pistão vinculam os RFs. Este é o exemplo de uma solução vinculada violando o primeiro axioma de projeto.

Com a máquina de *Watt*, a solução para o problema tornou-se uma solução não vinculada através da retirada do vapor da câmara para resfriamento, utilizando um condensador independente. Os parâmetros de projeto da concepção de *Watt* visando satisfazer os mesmos requisitos funcionais são:

- PP_1 = Injetar vapor;
- PP_2 = Condensar o vapor fora do cilindro, em um condensador separado.

A máquina de Watt opera da seguinte forma. Vapor é admitido através de uma válvula de vapor (ou válvula de entrada), no cilindro sobre o pistão com pressão levemente superior à pressão atmosférica, deslocando o pistão para baixo. Quando o pistão atinge o final do cilindro completando seu curso, uma válvula de equilíbrio é aberta e vapor passa do topo para a base do cilindro. Neste momento devido ao peso da bomba, o pistão sobe. Uma válvula de exaustão é então aberta e o vapor restante sobre o pistão é succionado para o condensador. Simultaneamente, a válvula de entrada é também aberta admitindo a entrada de vapor no topo do cilindro, iniciando um novo ciclo.

Desta forma, eliminando a dependência da função de injeção de vapor da função de condensação (criar vácuo), as quais ocorriam no mesmo cilindro, *Watt* obteve uma economia no consumo de vapor. Este é o exemplo de uma solução não vinculada, respeitando o primeiro axioma.

Para demonstrar um exemplo de solução semivinculada analisa-se um simples problema de projeto pertinente ao processo de pintura: obter uma cor específica a partir da mistura de tintas (Suh, 1990).

Os requisitos funcionais neste caso são:

- RF_1 = Produzir uma mistura de tintas em determinada vazão;
- RF_2 = Manter a razão entre a vazão das tintas ingredientes correta, para produzir a cor final desejada.

Uma solução para este problema é ilustrada através da Figura 3.10. Ambas concepções possuem dois tanques de alimentação conectados a uma câmara de mistura que,

através de um sistema de pás promove a mistura das tintas. Após atingida a uniformidade da mistura uma válvula abaixo da câmara libera a mistura das tintas em um reservatório.

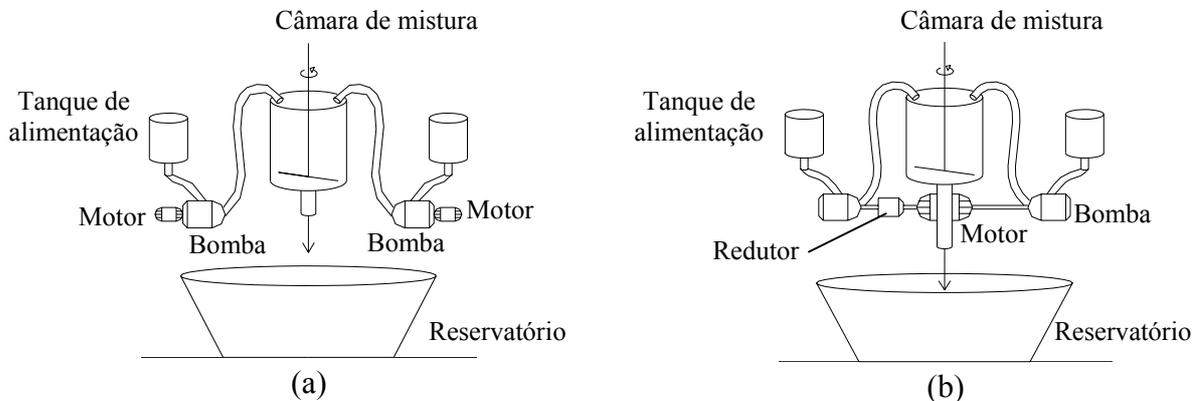


Figura 3.10 – Soluções para misturar tintas: (a) vinculada ; (b) semivinculada.

Na solução da Figura 3.10(a) os PPs são:

- $PP_1 = A$ vazão na qual uma das bomba opera;
- $PP_2 = A$ vazão na qual a outra bomba opera.

Por meio destes parâmetros de projeto obtém-se uma solução para o problema.

Porém, o controle de vazão e o controle da cor da mistura não estão separados (solução vinculada) e, por conseqüência, ocasionam uma deficiência a esta solução: a variabilidade entre as bombas não é controlada. Devido às variações entre os motores que propulsionam as bombas podem surgir inconsistências na coloração da tinta final.

Porém, mantendo a mesma variabilidade para ambas as bombas, as inconsistências na coloração da tinta são eliminadas. Isto pode ser conseguido através da utilização de apenas um motor conectado em ambas as bombas e utilizando um redutor em apenas uma das bombas, para variar a vazão, conforme ilustrado na Figura 3.10(b). Os parâmetros de projeto para esta solução são:

- $PP_1 = A$ vazão na bomba não conectada ao redutor
- $PP_2 = O$ valor da redução aplicada

Desta forma, elimina-se a dependência entre os RFs estabelecendo primeiramente o valor da redução a ser aplicada no redutor, para obter a cor desejada, e posteriormente determina-se a vazão necessária através da bomba não conectada ao redutor. É importante salientar que a ordem de configuração dos PPs neste caso é determinante, caracterizando-se como uma solução semivinculada, pois se a vazão da bomba for estabelecida previamente ao fator de redução, a vazão deverá ser reajustada novamente.

Assim, através dos exemplos citados anteriormente, procurou-se ilustrar a classificação das soluções de projeto segundo a abordagem axiomática e apresentar de forma clara o conceito da matriz de projeto em expressar as relações existentes entre os diferentes domínios da abordagem axiomática.

3.5 - O processo de projeto segundo a abordagem axiomática e as equivalências com o Modelo Consensual

Assim como no Modelo Consensual, a primeira tarefa a ser realizada na abordagem axiomática é a definição do problema. Normalmente é estabelecida na forma de um texto, descrevendo o problema e as necessidades dos usuários a serem atendidas.

Posteriormente devem ser estabelecidos os requisitos funcionais do projeto. Na abordagem axiomática os objetivos do projeto são sempre estabelecidos no domínio funcional, enquanto que a solução é sempre estabelecida no domínio físico. O projeto então, envolve interligar estes dois domínios para cada nível hierárquico. (Suh, 1990)

Suh propõe abordagens diferentes na determinação dos requisitos funcionais: para projeto original e para reprojeto. Quando a meta for a criação de soluções que ainda não existem, as necessidades detectadas são diretamente “traduzidas” em um conjunto de RFs e o problema passa a ser definido em termos destes.

Por outro lado, quando a meta for o aprimoramento de um projeto existente, *Suh* sugere que sejam estabelecidos os RUs, os quais posteriormente devem ser incorporados aos RFs. O autor sugere a utilização da Casa da Qualidade para “transformar” tais RUs em RFs, conforme ilustrado na Figura 3.11.

Para ambas as situações, os RFs devem ser estabelecidos de modo neutro, sem considerar ou relacionar uma solução no domínio físico, evitando assim soluções pré-concebidas.

Suh utiliza o termo atributos do usuário (*customer attributes*) para descrever as necessidades dos clientes no domínio usuário. Porém, como a grande maioria dos pesquisadores tem utilizado o termo Requisito de Usuário para referir-se às necessidades dos clientes, tal terminologia será também utilizada neste trabalho. Uma análise mais profunda sobre tais semelhanças e diferenças pode ser vista em Fonseca (2000).

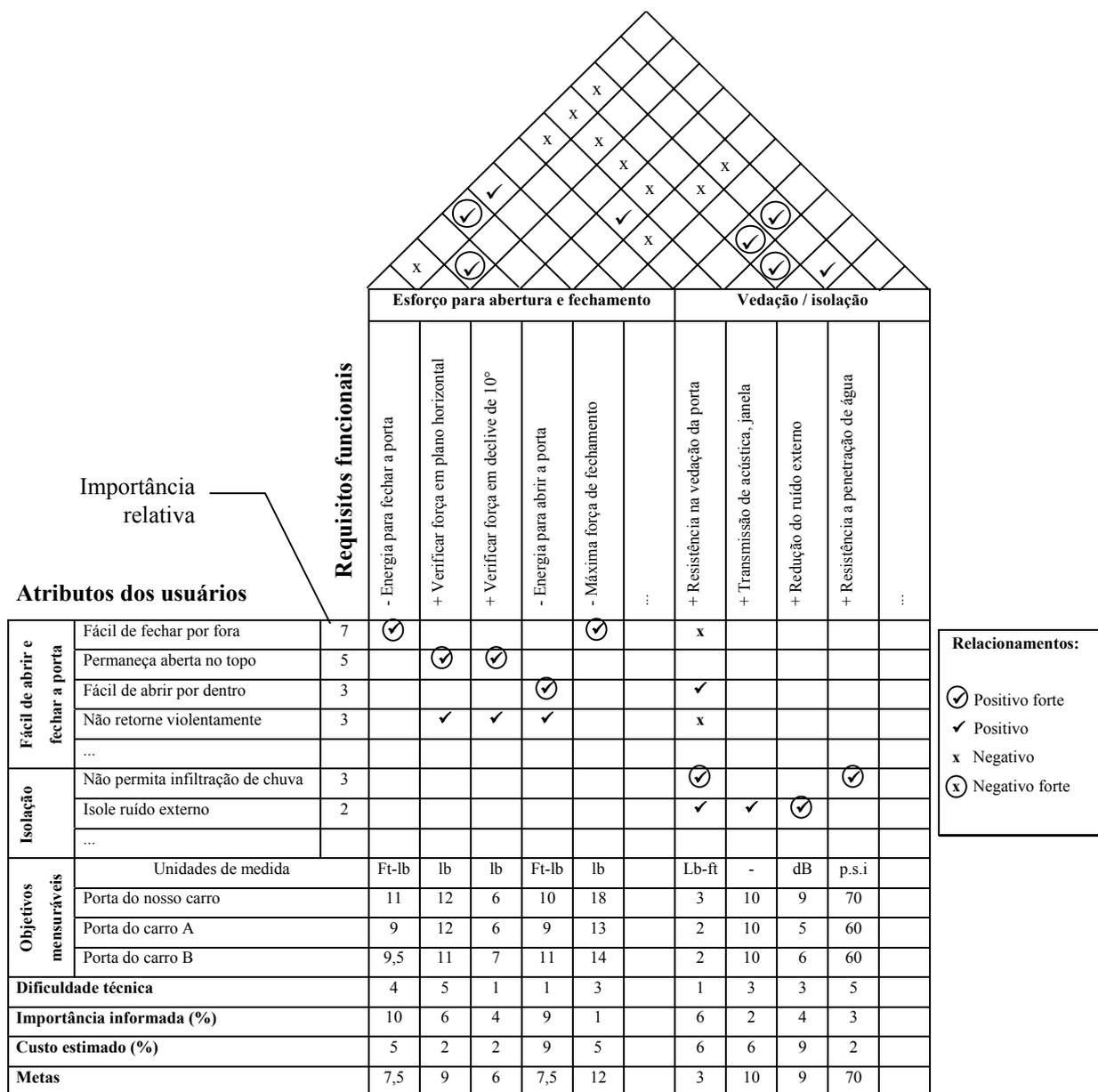


Figura 3.11 – Exemplo de utilização da Casa da Qualidade para “traduzir” RUs em RFs (Suh, 1990).

Para traduzir os RUs em RFs *Suh* insere os RFs na casa da qualidade como se fossem requisitos de projeto – ou características de engenharia, segundo Magrab (1997) e Hauser & Clausing (1998) *apud* Suh (1990). Porém, analisando os conceitos associados a cada termo, verifica-se que os RFs não seriam sinônimos de requisitos de projeto, mesmo que o autor os tenha inserido na Casa da Qualidade como tal. Uma análise comparativa visando esclarecer estas semelhanças e ou diferenças é realizada ao final deste tópico.

Verifica-se então que o autor sugere apenas a utilização da Casa da Qualidade em reprojeto. Em projetos originais, os RFs são estabelecidos a partir da definição do problema sem o estabelecimento dos RUs. Porém, a utilização da Casa da Qualidade pode resultar em benefícios também quando o problema envolver uma solução original, pois tal ferramenta, além

de priorizar as necessidades dos clientes, permite um melhor entendimento do problema. O Modelo Consensual prevê a utilização da Casa da Qualidade em ambas as situações.

Independente do problema de projeto, original ou reprojeto, o estabelecimento dos RFs é realizado de forma hierárquica e sua decomposição irá descrever o produto de um determinado nível de abstração para níveis mais detalhados. A mesma afirmação aplica-se aos PPs, que devem ser estabelecidos no domínio físico para satisfazer os RFs.

Porém, na abordagem axiomática este processo de decompor os RFs é realizado paralelamente à decomposição dos PPs, diferentemente da abordagem descrita pelo Modelo Consensual, onde primeiramente realiza-se toda a decomposição funcional e posteriormente iniciam-se as buscas por soluções.

Quando se realiza o processo de decomposição, deve-se ter em mente que as decisões tomadas em níveis elevados da hierarquia afetarão os níveis inferiores. Assim, analisando as abordagens descritas anteriormente, verifica-se que o processo de decomposição em paralelo, prescrito pelo conceito *zigzagging* da abordagem axiomática, apresenta vantagem em relação à decomposição realizada no Modelo Consensual, pois antes que os RFs possam ser decompostos, os correspondentes PPs devem ser selecionados direcionando a escolha dos novos RFs a serem decompostos.

Segundo a abordagem axiomática, os RFs são também sujeitos a restrições (Rs), as quais representam os limites, as condições que os RFs devem satisfazer. Se o produto a ser projetado não ultrapassar as restrições estabelecidas, então a solução é aceitável.

Existem dois tipos de restrições: restrições de projeto, as quais são restrições estabelecidas como especificações de projeto, e restrições do meio as quais são impostas pelo sistema onde a solução de projeto irá operar. As restrições de projeto são normalmente expressas como limites em dimensões, pesos, materiais e custo. As restrições do meio refletem as capacidades de máquinas e leis da natureza.

Suh salienta a dificuldade em determinar quando determinado requisito deveria ser classificado como RF ou como Restrição (R). Visando auxiliar o esclarecimento de tal classificação, o autor sugere que por definição, as Rs são diferentes dos RFs pois não necessitam ser independentes umas das outras e dos RFs. Outra característica para distinção é o fato de as Rs não possuírem tolerâncias associadas a elas, enquanto que os RFs normalmente possuem tolerâncias.

As restrições podem também existir durante o processo de decomposição dos RFs e PPs. Neste processo, através das trocas entre os domínios prescrito pelo conceito *zigzagging*, o

que seriam PPs em um nível mais elevado da hierarquia no domínio físico, podem tornar-se restrições para os demais PPs em níveis inferiores, pois a escolha de uma “solução” em nível elevado direciona a escolha das demais.

Após realizada a decomposição dos RFs e PPs deve-se realizar o mapeamento entre estes domínios. Elabora-se então a matriz de projeto, indicando as relações de dependências.

Nesta fase do projeto, o primeiro axioma é utilizado para verificação da melhor solução. Tal avaliação, deverá ser realizada para cada nível da hierarquia de projetos, existindo 3 tipos de soluções conforme descrito no item 3.4: solução não vinculada, vinculada e semivinculada.

Uma solução não vinculada sempre irá respeitar o primeiro axioma, pois os PPs e RFs estão relacionados de forma que a independência dos RFs seja satisfeita.

Uma solução vinculada não respeita o primeiro axioma de projeto, e portanto, não é considerada uma “boa” solução de projeto. Deve-se então descartá-la, ou reestabelecer os PPs visando satisfazer os RFs. Uma forma de não descartar a solução de projeto quando apresenta-se como uma solução do tipo vinculada seria o estabelecimento de novas restrições, ou seja, uma faixa maior de tolerâncias, com o objetivo de torná-la uma solução não vinculada ou semivinculada, estabelecendo assim a independência dos RFs, desde que as novas tolerâncias ainda satisfaçam cada RF.

Uma solução semivinculada irá satisfazer o primeiro axioma caso as alterações nos PPs, quando necessárias, sejam realizadas respeitando determinada ordem.

Como os PPs são estabelecidos de maneira independente da solução, após realizado o mapeamento entre RFs e PPs e a verificação quanto à validade do primeiro axioma, realiza-se a busca por soluções para cada PPs, de modo que ainda mantenham o mesmo mapeamento anteriormente verificado. Deve-se especificar também para cada PP sua capacidade de atendimento aos RFs, ou seja, suas tolerâncias, com o objetivo de atender as restrições dos RFs e posteriormente permitirem a avaliação mediante o segundo axioma de projeto, caso exista mais de uma solução que atenda ao primeiro axioma.

Quando isto ocorrer, ou seja, existirem várias soluções onde primeiro axioma seja satisfeito, o segundo axioma deverá ser utilizado para selecionar qual será a melhor alternativa. Este axioma estabelece que entre todos os projetos que satisfaçam o primeiro axioma, aquele com menor conteúdo de informação é o melhor.

Através das restrições dos RFs e as tolerâncias associadas à capacidade de cada PP, pode-se verificar qual solução de projeto apresenta menor conteúdo de informação, ou seja, o conteúdo de informação pode ser mensurado pela probabilidade com que um PP satisfaça determinado RF. A formulação matemática para determinar a quantidade de informação de uma solução será apresentada no capítulo 4. Por enquanto, cabe salientar apenas que quanto mais simples, melhor o projeto. Desta forma, projetos que minimizam o número de requisitos funcionais e restrições, apresentem partes integradas preservando sua independência funcional, utilizem componentes padronizados e intercambiáveis e, apresentem simetria tanto quanto possível, resultarão em projetos que possuem um conteúdo de informações reduzido, o que significa a maior probabilidade de sucesso.

Com base nas considerações anteriores pode-se fazer uma comparação entre a abordagem axiomática e o Modelo Consensual, no que se refere aos modelos de produto durante o processo de projeto, conforme ilustra a Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Comparação entre os modelos de produto no Modelo Consensual e na abordagem axiomática.

Modelo de Produto	Modelo Consensual	Abordagem Axiomática
Modelo Usuário	Necessidades dos clientes: geralmente genéricas e qualitativas refletem os interesses ou as manifestações dos clientes do projeto em todo seu ciclo de vida.	Requisitos do Usuário (RUs): expressam as necessidades e expectativas dos usuários ao longo de todo o ciclo de vida do produto.
Modelo Especificações	Requisitos de projeto: são requisitos quantificados, que estabelecem os principais problemas técnicos a serem resolvidos e as restrições de solução.	Restrições (Rs): representam os limites, condições que os RFs devem satisfazer. Se o produto a ser projetado não ultrapassar as restrições estabelecidas, então a solução é aceitável.
Modelo Funcional	Funções: a partir da análise e abstração dos requisitos de projeto determinam-se as funções que o produto deverá desempenhar, ou seja, a relação entre suas entradas e saídas.	Requisitos Funcionais (RFs): são definidos como o mínimo, não único conjunto de requisitos independentes, representando as ações ou conjunto de ações que o produto deverá realizar para satisfazer as necessidades dos usuários.
Modelo Pseudofísico	Efeitos Físicos: são descritos quantitativamente por leis físicas e estabelecidos de forma independente da solução. Podem ser combinados de forma a satisfazer uma função específica.	Parâmetros de Projeto (PPs): são os elementos da solução de projeto no domínio físico, estabelecidos de forma independente da solução e escolhidos para satisfazer os requisitos funcionais especificados.
Modelo Físico Individual	Princípios de solução: reflete o efeito físico requerido para o cumprimento da função, bem como formas e materiais a serem empregados.	Idéias ou conceitos: são soluções específicas que atendem aos PP. Podem existir várias soluções que atendam a cada PP.
Modelo Físico Conjunto	Concepção alternativa: são as combinações compatíveis, física e geometricamente, dos princípios de solução.	Solução preliminar: são as configurações das idéias de cada PP com a compatibilidade de suas interfaces, e que satisfaçam os axiomas de projeto.

Entende-se por modelo uma representação de um objeto real (Ferreira, 1997). É fruto de uma idealização mental, acumula informações a respeito desta entidade e assim é capaz de a descrever. Assim, na primeira coluna da Tabela 3.3 foram atribuídos nomes característicos aos diferentes modelos de produto. Ou seja, as funções do produto, por exemplo, representam um modelo do produto a ser projetado e a ele denominou-se modelo funcional do produto.

Observa-se que os modelos nos diferentes domínios da abordagem axiomática assemelham-se aos modelos definidos no Modelo Consensual de projetos. Porém, como descrito anteriormente, as definições associadas a cada um deles diferem, e são aqui comparados apenas com o intuito de auxiliar o entendimento das abordagens.

Atenção especial é dedicada ao modelo denominado pseudofísico. Através da análise dos conceitos associados em cada modelo, este reflete maiores discrepâncias. Os efeitos físicos expressam leis físicas que irão determinar o comportamento das soluções, enquanto que os PPs expressam quais parâmetros deverão ser controlados no projeto de forma que seja possível manter a independência dos RFs. Porém, ambos são estabelecidos de forma independente da solução. Outro diferencial deve-se ao fato de os PPs serem utilizados na determinação do mapeamento entre os domínios funcional e físico. Tal mapeamento não é previsto pelo Modelo Consensual, enquanto na abordagem axiomática deve-se descrever por meio deste mapeamento se o primeiro axioma de projeto é violado ou não.

3.6 - Pesquisas em Projeto Axiomático

A partir de *Suh*, muitos outros autores têm realizado estudos e aplicações utilizando a abordagem axiomática.

Harutunian et al (1996) propõe a utilização da abordagem axiomática de forma a monitorar as conseqüências de uma alteração de projeto. Através da matriz de projeto, que irá conter as relações existentes entre funções e soluções para cada nível da hierarquia de projeto, pode-se verificar as propagações de uma alteração nos demais níveis hierárquicos, e desta forma em todo o projeto.

Magrab (1997) também utilizou a abordagem axiomática para solução de problemas de projeto. Em seu livro, combina a ferramenta QFD com a abordagem axiomática através de vários exemplos, e afirma que quando apropriado os requisitos de projeto deveriam ser agrupados por meios dos requisitos funcionais, ou seja, os requisitos funcionais deveriam ser

primeiramente estabelecidos e utilizados para organizar os requisitos de projeto na ferramenta QFD.

Yang & Zhang (2000) e Kim & Cochran (2000) realizaram estudos visando determinar as compatibilidades entre a abordagem axiomática e a Teoria da Solução de Problemas Inventivos (também chamada de TRIZ devido à abreviação de origem russa) desenvolvida na União Soviética por Altshuller (1988) e co-autores.

Dimarogonas (1993) realiza uma revisão histórica da área de projeto e salienta a importância de princípios de projeto no processo de tomada de decisões. Segundo o autor, um conjunto de princípios gerais foram primeiramente estabelecidos por *Redtenbacher* em 1852 e 1862, porém eram contraditórios e sobrepostos na grande maioria de suas aplicações para se tornarem um sistema formal de axiomas de projeto. Um conjunto mais abstrato de princípios de projeto também foi introduzido por *Reuleaux* em 1854, tratando separadamente forma e função. As duas grandes regras eram:

Regra da função: o projeto deve satisfazer seus requisitos de maneira uniforme.

Regra da forma: a forma final do projeto deve possuir a maior possibilidade de simetria.

Dimarogonas afirma que o primeiro axioma de *Suh* apenas assemelha-se à primeira grande regra de *Reuleaux*, apresentando diferenças, mas que o segundo axioma é essencialmente igual à segunda grande regra de *Reuleaux*. Afirma ainda que a qualidade do projeto expressa pelas equações de *Suh* não está relacionada com o modo como os coeficientes da matriz de projeto estão posicionados e que a base matemática do primeiro axioma de *Suh* não é válida. Também contesta se os axiomas deveriam ser denominados como tal, ou apenas como regras, embora aceite o fato que em determinadas situações tais axiomas conduzem a resultados satisfatórios. *Dimarogonas* ainda afirma que existem inúmeros exemplos de projeto que contradizem os axiomas, porém não cita exemplos concretos de modo a provar a invalidade dos mesmos. Desta forma, o autor propõe uma unificação das regras de *Reuleaux* e dos princípios de *Taguchi*, sugerindo assim novos princípios de projeto.

Marston & Mistree (1997) realizam estudos da aplicabilidade da abordagem axiomática e de projeto baseado em decisões em projeto variante¹ (Pahl & Beitz, 1996) afirmando que sob tais condições a satisfação dos axiomas de projeto nem sempre é possível. Os

¹ Projeto Variante: onde a configuração dos componentes está amplamente predeterminada e a liberdade do projeto é limitada.

autores também salientam que até 25% da atividade de projeto mecânico é dedicada a projeto variante, identificando limitações na utilização da abordagem axiomática.

Ringstad (1997) realiza uma comparação entre as abordagens Axiomática (Suh, 1990) e Árvore de funções/meios (Andreasen, 1992) na realização da decomposição funcional de um produto. O autor não se preocupa com a exata definição do termo função mas enfatiza o efeito da utilização de métodos de projeto que são baseados em funções e na decomposição funcional. Também destaca a importância da síntese e análise no processo de projeto. Através de sua análise *Ringstad* salienta as vantagens da utilização da abordagem axiomática mas salienta as deficiências na elaboração dos requisitos funcionais. Também afirma que os axiomas de projeto deveriam ser tratados como dois princípios de projeto, entre muitos outros, aplicáveis a muitos casos.

Através desta revisão da literatura, verifica-se que a abordagem axiomática contribui para o desenvolvimento de produtos, porém apresenta algumas deficiências e ainda não apresenta uma opinião uniforme dos autores quanto à denominação dos axiomas como grandes regras ou realmente axiomas (Sozo et al, 2001). Vários exemplos demonstrando a potencialidade desta abordagem foram ilustrados, porém não foram encontrados na literatura exemplos constituindo-se de exceções de modo a invalidar os axiomas.

3.7 - Considerações finais

Através deste capítulo, foram relatados os principais conceitos da abordagem axiomática, sua evolução e as pesquisas envolvendo tal abordagem. Definiram-se também as tarefas a serem realizadas no processo de projeto segundo a abordagem axiomática e as semelhanças e diferenças com o Modelo Consensual. Embora existam várias, a principal diferença é relatada pela utilização dos axiomas de projeto como critérios no processo de tomada de decisões e, conforme constatado no capítulo 2 deste trabalho, o Modelo Consensual de fato apresenta critérios e orientações de maneira a serem seguidos, porém são muitas vezes dependentes do domínio em questão, inexistindo um conjunto de especificações de projeto que possa ser usado de modo geral para todas as áreas de projeto.

Assim no capítulo que segue, será realizada uma análise da abordagem axiomática visando sua utilização no processo de tomada de decisões da fase de projeto conceitual de produtos, para seleção de concepções alternativas. Os axiomas de projeto de *Suh* são considerados como medidas da qualidade do projeto. Porém a absoluta satisfação destes axiomas

nem sempre é possível para todos os projetos. Desta forma, a abordagem axiomática será analisada e estruturada de forma que tais axiomas possam ser utilizados como critérios a serem maximizados, objetivando sempre suportar o julgamento humano, mas não substituí-lo.

4 - A ABORDAGEM AXIOMÁTICA NA SELEÇÃO DE CONCEPÇÕES ALTERNATIVAS

“Nada é mais perigoso que uma idéia se você só tem uma.”

(anônimo)

4.1 - Introdução

O projeto conceitual de produtos visa obter uma ou mais concepções de produto para satisfazer os clientes do projeto, traduzidos na forma de manifestações oriundas das fontes de problemas e ou necessidades de projeto. Estas concepções, denominadas concepções alternativas, são muitas vezes o ponto forte do processo de projeto devido à elevada quantidade gerada das mesmas e simultaneamente o ponto fraco, devido à dificuldade de apreciar as alternativas.

Neste sentido, este capítulo tem o propósito de analisar a abordagem axiomática visando à sua aplicação no processo de tomada de decisões pertinentes à seleção de concepções alternativas da fase de projeto conceitual de produtos, uma vez que os axiomas de projeto são considerados como medidas da qualidade do projeto.

Porém, conforme mencionado no capítulo anterior, a absoluta satisfação do primeiro axioma nem sempre é possível para todos os projetos e, na forma como é apresentada por Suh (1990), verifica-se a obrigatoriedade de satisfação deste. Assim, a abordagem axiomática será analisada e estruturada de maneira a propiciar uma aplicação mais ampla da mesma, fazendo com que os dois axiomas de projeto possam ser utilizados como critérios a serem maximizados no processo de tomada de decisões ao longo do processo de projeto.

4.2 - Reformulação da Abordagem Axiomática

Conforme originalmente proposta por *Suh*, a abordagem axiomática prevê a

seleção de alternativas de projeto através do atendimento aos seus axiomas.

A Figura 4.1 ilustra este processo, onde primeiramente realiza-se uma avaliação das alternativas de projeto com relação ao axioma da independência, e apenas as soluções que contemplem este são avaliadas segundo o axioma da informação.

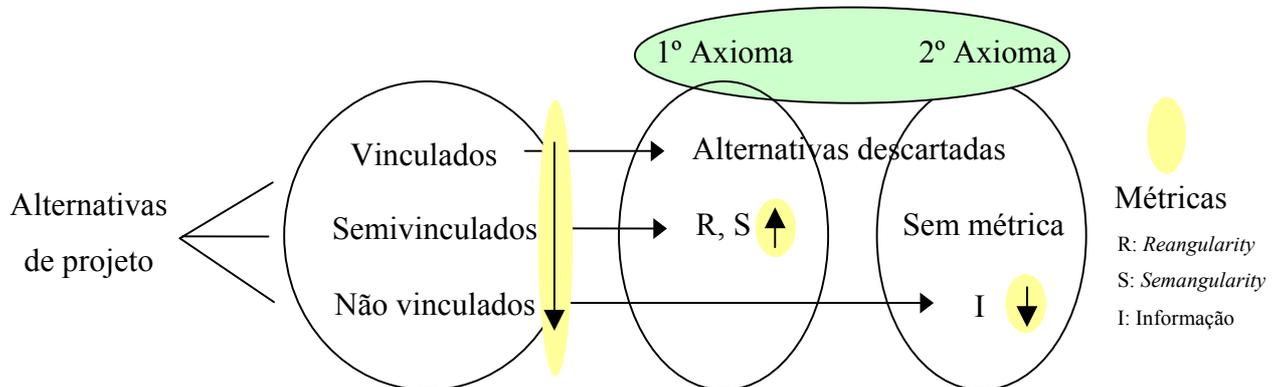


Figura 4.1 - Abordagem axiomática conforme Suh (1990).

Como se pode observar, as alternativas de projeto do tipo vinculadas são descartadas. Desta forma, as avaliações realizadas mediante o primeiro axioma podem ser entendidas como testes "passa/não passa". Suh (1990) afirma que projetos que desrespeitem o primeiro axioma não poderão ser produzidos devido às relações de vínculo entre os domínios, e por isto devem ser desconsiderados. Em contrapartida, vários autores conforme mencionado no capítulo anterior, opõem-se a esta afirmação salientando o fato de que a absoluta satisfação do primeiro axioma nem sempre é possível para todos os projetos, em especial nas situações onde as configurações dos componentes estejam amplamente predeterminadas, limitando a liberdade do projeto. Nestes casos, a aplicação da abordagem axiomática conforme prevista por *Suh* estaria inviabilizada, pois a completa satisfação do primeiro axioma provavelmente não seria atendida, e como proposta pelo autor, tem-se a obrigatoriedade de satisfação, sem procurar sua maximização.

Para as alternativas de projeto do tipo semivinculadas existem as métricas “R” e “S” (detalhadas no item 4.3.2) para avaliar as alternativas segundo o primeiro axioma, mas não existe métrica para avaliá-las em relação ao segundo axioma. Assim, a seleção destas alternativas fica limitada ao primeiro axioma.

As alternativas de projeto não vinculadas não necessitam ser avaliadas com relação ao primeiro axioma, pois apresentam-se como não vinculadas. Sua avaliação é realizada apenas através da métrica “I” (detalhada no item 4.3.3) em relação ao segundo axioma.

Mesmo que a abordagem axiomática ainda não apresente uma uniformidade na opinião dos pesquisadores, principalmente no que se refere às avaliações relacionadas com o primeiro axioma, os resultados obtidos, demonstrados através dos exemplos ilustrados ao decorrer deste trabalho, têm revelado uma grande potencialidade da mesma.

Desta forma, propõe-se uma reformulação da abordagem axiomática principalmente em relação ao seu primeiro axioma, de forma que os mesmos possam ser utilizados como critérios a serem maximizados no processo de tomada de decisões.

Assim, os axiomas propostos por *Suh* são aqui restabelecidos como segue:

Primeiro critério: dentre várias alternativas de projeto, aquela que apresentar o menor grau de dependência funcional será a melhor.

Segundo critério: dentre várias alternativas de projeto, aquela que apresentar o menor conteúdo de informação, será a melhor.

A necessidade de restabelecimento dos axiomas é justificada da seguinte forma:

- devido às contradições existentes entre os pesquisadores com relação a denominação dos axiomas como tal, neste trabalho preferiu-se denominá-los como critérios e não como axiomas, mesmo que até então não tenham sido encontrados exemplos ou exceções publicadas na literatura que venham a invalidá-los. Não é objetivo deste trabalho verificar a validade dos mesmos, mas apenas utilizá-los, pois sua grande potencialidade foi comprovada através de diversos exemplos publicados na literatura e neste trabalho;

- devido à inviabilidade de aplicação da abordagem axiomática quando o primeiro axioma não puder ser satisfeito. O primeiro axioma é então restabelecido como critério a ser maximizado, igualmente ao segundo.

Entenda-se por alternativas de projeto neste trabalho como sinônimo de concepções alternativas geradas durante a fase de projeto conceitual. Esta simplificação deve-se à limitação de escopo deste trabalho na utilização da abordagem axiomática para seleção de concepções alternativas na fase de projeto conceitual, conforme mencionado no capítulo 2.

Também por motivos de simplificação, serão utilizadas abreviações para se referir às métricas que refletem a satisfação aos axiomas, porém, traduzidas para a língua portuguesa visando proporcionar maior clareza ao leitor e, sendo assim utilizados ao decorrer deste trabalho.

Propõe-se então a utilização dos axiomas como metas, a serem atingidas através da maximização ou redução de métricas que irão medir a satisfação destes durante o processo de projeto. A abordagem então proposta é ilustrada através da Figura 4.2, onde: “*T_c*”, “*A_i*” e “*I*” são as métricas a serem utilizadas nas avaliações das alternativas de projeto e detalhadas nos

itens a seguir.

Para realizar a escolha da melhor alternativa de projeto, primeiramente classificam-se as alternativas em vinculadas, semivinculadas e não vinculadas, igualmente ao proposto por *Suh*. Tal classificação é determinada em função dos relacionamentos entre os domínios funcional e físico, descritos através da matriz de projeto. Para cada classificação irão existir métricas a serem otimizadas maximizando assim a satisfação aos axiomas de projeto.

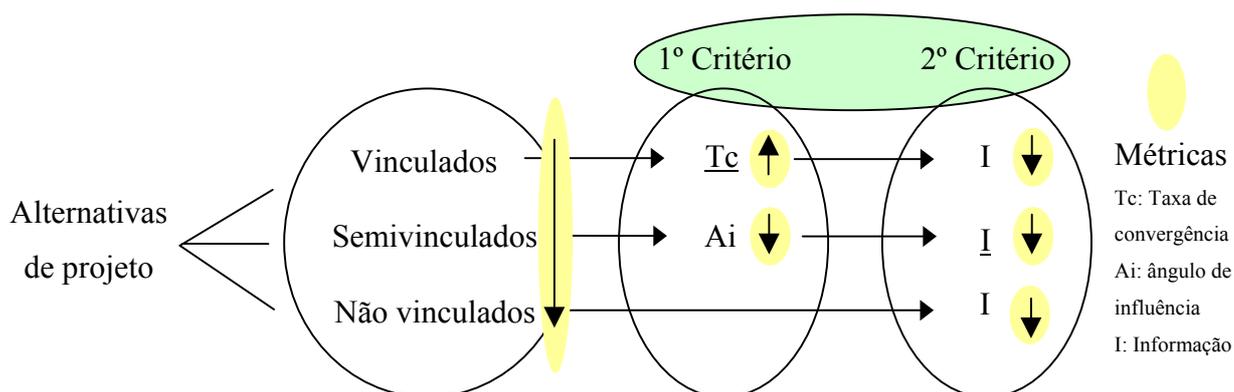


Figura 4.2 - Abordagem proposta

O sentido das setas indica a direção a ser seguida, ou seja, quando houver a necessidade de comparação entre alternativas vinculadas, semivinculadas e não vinculadas, deve-se dar preferência às alternativas não vinculadas, seguindo-se as alternativas semivinculadas e por último as vinculadas. Quando as alternativas apresentarem a mesma classificação, o sentido das setas indica se as métricas devem ser maximizadas ou reduzidas, ou seja: a melhor solução, caso as alternativas apresentem-se como alternativas do tipo vinculadas, será aquela que apresentar o maior valor para a métrica Tc e o menor valor para I . Caso apresentem-se como alternativas semivinculadas, a escolhida será aquela que apresentar o menor valor para a métrica Ai e para a métrica I e, caso apresentem-se como alternativas não vinculadas, será aquela que apresentar o menor valor apenas para a métrica I . Tais métricas serão definidas a seguir, no item 4.3.2 e 4.3.3.

Com relação à avaliação das soluções vinculadas e semivinculadas é importante salientar a situação ilustrada na Tabela 4.1 que aparentemente demonstra uma ambigüidade, ou seja, tem-se duas alternativas de projeto onde a alternativa 1 deveria ser selecionada ao tomar-se por base o primeiro axioma como critério. Em contraposição, se o segundo axioma for utilizado como critério, a alternativa 2 deveria ser selecionada, pois apresenta um menor conteúdo de informações. Porém, a ambigüidade desaparece quando os critérios são analisados

simultaneamente estabelecendo uma prioridade de atendimento aos conceitos de independência funcional e conteúdo de informações.

Tabela 4.1 – Avaliação de alternativas de projeto vinculadas e semivinculadas: caso particular.

Critério	Alternativa 1	Alternativa 2
1º axioma	Maior independência funcional	Menor independência funcional
2º axioma	Maior conteúdo de informações	Menor conteúdo de informações

Ou seja, caso as alternativas apresentem-se como vinculadas é preferível aquela que apresentar um maior grau de independência funcional mesmo que apresente um maior conteúdo de informações, pois esta necessitaria de menos interações para satisfazer seus requisitos funcionais e apresenta menor complexidade de operação (Frey et al, 2000). Portanto, a alternativa 1 deve ser selecionada, e nestas situações prioriza-se a satisfação do primeiro axioma.

Caso as alternativas apresentem-se como semivinculadas é preferível aquela que apresentar um menor conteúdo de informações mesmo que apresente uma menor independência funcional, pois a maior probabilidade de sucesso dada pelo menor conteúdo de informações compensa a tarefa de alterar os PPs em determinada ordem. Portanto, a alternativa 2 deve ser selecionada, e nestas situações prioriza-se a satisfação ao segundo axioma, pois o primeiro já é atendido pelas soluções semivinculadas.

Tais priorizações, ora ao primeiro axioma ora ao segundo, são ilustradas na Figura 4.2 por meio das métricas T_c e A_i aparecendo sublinhadas.

Visando exemplificar o processo de avaliação proposto são ilustrados na Tabela 4.2 alguns exemplos hipotéticos (cabe salientar que não existe uma escala ou faixa para as métricas, como por exemplo valores entre 0 e 10. Deve-se maximizar ou minimizar tanto quanto possível cada uma delas). Considerando apenas as alternativas A, B e C dentre as soluções vinculadas, a escolhida seria a alternativa B, pois apresenta o menor grau de independência funcional. Porém incluindo-se a alternativa D às demais, esta última seria a vencedora, pois além de apresentar o menor grau de independência funcional apresenta também o menor conteúdo de informações.

De modo similar, considerando apenas as alternativas A, B e C dentre as soluções semivinculadas, a escolhida seria a alternativa C, pois apresenta o menor conteúdo de informações. Porém incluindo-se a alternativa D às demais, esta última seria a vencedora, pois

além de apresentar o menor conteúdo de informações apresenta o menor grau de independência funcional.

Tabela 4.2 – Exemplos de soluções: (a) vinculadas, (b) semivinculadas.

		Critérios	
		Tc ↑	I ↓
Alternativas	A	5	3
	B	7	2
	C	6	1
	D	7	1

(a)

		Critérios	
		Ai ↓	I ↓
Alternativas	A	4	4
	B	5	3
	C	6	2
	D	4	2

(b)

Quando houver a necessidade de comparação entre alternativas classificadas em diferentes tipos, deve-se dar preferência às alternativas não vinculadas, seguindo-se as alternativas semivinculadas e por último as vinculadas. Por exemplo: entre a alternativa C classificada como vinculada e a alternativa C classificada como semivinculada a selecionada deve ser a alternativa C do tipo semivinculada, pois esta última não viola o primeiro axioma e necessitaria de menos interações para satisfazer seus requisitos funcionais, apresentando menor complexidade de operação.

Desta forma, através da introdução destas métricas viabiliza-se a aplicação da abordagem axiomática nas situações onde a completa satisfação do primeiro axioma não pode ser atingida e permite-se avaliar as soluções semivinculadas também em relação ao segundo axioma.

A seguir, serão então descritas as métricas e o modo pelo qual serão computadas.

4.3 - Métricas de avaliação segundo a abordagem axiomática para seleção de concepções alternativas

Para maximizar a satisfação dos axiomas de projeto devem ser utilizadas métricas que representem o grau de atendimento aos mesmos.

Visando facilitar o entendimento do leitor, antes de introduzir a formulação matemática de tais métricas, será introduzida a representação gráfica do processo de

mapeamento entre os domínios funcional e físico, a qual servirá de base para determinação das métricas de avaliação para o primeiro axioma de projeto. Pretende-se então demonstrar graficamente como a magnitude dos elementos da matriz de projeto afetam os relacionamentos entre RFs e PPs e como um PP pode vincular os RFs, para auxiliar a visualização do conceito de independência funcional. A representação gráfica do segundo axioma será demonstrada no item 4.3.3 juntamente com a definição da métrica I .

4.3.1 - Representação gráfica do mapeamento entre os domínios físico e funcional

Conforme mencionado nos capítulos anteriores, o processo de projeto na abordagem axiomática é realizado através de uma operação de mapeamento, partindo-se do domínio funcional para o domínio físico. A natureza deste mapeamento é descrita pela Equação (3.1) previamente mencionada no capítulo 3, onde a matriz de projeto $[A]$ demonstra os relacionamentos entre um dado vetor de RFs e um vetor de PPs.

$$\{\text{RF}\} = [A] \times \{\text{PP}\} \quad (3.1)$$

Para o caso bidimensional $[A]$ pode ser representada através da Equação (4.1):

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

O vetor RF para o caso bidimensional pode ser representado graficamente por dois eixos ortogonais, RF_1 e RF_2 , pois por definição os RFs são independentes entre si com relação ao primeiro axioma. De maneira a mapear o domínio físico no domínio funcional, os dois eixos que definem o domínio físico, eixo PP_1 e eixo PP_2 devem ser sobrepostos aos eixos RF_1 e RF_2 . Porém, diferentemente dos eixos que definem o domínio funcional, os eixos PP_1 e PP_2 não são obrigatoriamente ortogonais, pois a abordagem axiomática prevê a independência entre RFs, e não entre os PPs. O que será demonstrado através desta representação gráfica é que o primeiro axioma requer que os eixos PPs e RFs sejam paralelos entre si. Portanto, de maneira a não violar o primeiro axioma os PPs deverão ser ortogonais, uma vez que os RFs são ortogonais.

O relacionamento entre os domínios físico e funcional será então determinado pelos ângulos α_1 e α_2 , os quais representam o ângulo entre os eixos RF_1 e PP_1 e entre os eixos RF_2 e PP_2 , respectivamente, conforme ilustra a Figura 4.3.

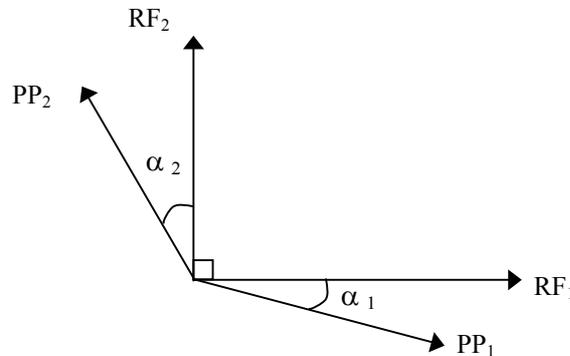


Figura 4.3 – Representação gráfica do mapeamento entre RFs e PPs, para o caso bidimensional.

A resolução da equação (3.1), pode ser descrita através da Equação (4.2),

$$\begin{bmatrix} RF_1 \\ RF_2 \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} A_{11} \\ A_{21} \end{Bmatrix} \times PP_1 + \begin{Bmatrix} A_{12} \\ A_{22} \end{Bmatrix} \times PP_2 \quad (4.2)$$

caracterizando as direções x e y dos vetores PP_1 e PP_2 . Assim, a inclinação destes pode ser facilmente calculada, obtendo-se os valores de α_1 e α_2 por meio das Equações (4.3) e (4.4).

$$\alpha_1 = \tan^{-1} \left(\frac{A_{21}}{A_{11}} \right) \quad (4.3)$$

$$\alpha_2 = \tan^{-1} \left(-\frac{A_{12}}{A_{22}} \right) \quad (4.4)$$

O sinal negativo introduzido a Equação (4.4) tem apenas a finalidade de alterar o eixo com o qual o ângulo é medido, informando α_2 com o eixo RF_2 e não com o eixo RF_1 .

Quando α_1 e α_2 forem iguais a zero os eixos PP_1 e PP_2 são paralelos/coincidentes aos eixos RF_1 e RF_2 , respectivamente. Tal situação é ilustrada pela Figura 4.4 e descreve a situação de projeto não vinculado, pois o RF_1 é dependente somente do PP_1 , assim como o RF_2 depende apenas do PP_2 . Uma alteração nos RFs do estado A para o estado C neste tipo de projeto

pode ser obtida simplesmente alterando o PP_1 do estado A para D, e o PP_2 do estado A para B. Ou seja, em projetos do tipo não vinculados a ordem de alteração dos PPs não afetam os RFs e qualquer alteração pode ser realizada sem a necessidade de considerar os efeitos desta sobre os demais RFs.

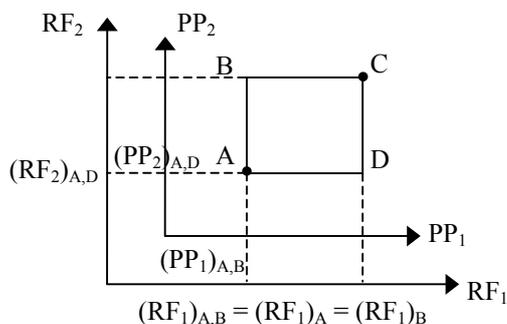


Figura 4.4 – Representação gráfica de uma solução não vinculada

Como mencionado no capítulo anterior, em determinadas situações a ordem de alteração dos PPs deve ser realizada de maneira a não violar o primeiro axioma. Tal situação pode ser ilustrada através da Figura 4.5 e representa uma solução semivinculada. Neste caso, um dos ângulos α é diferente de zero.

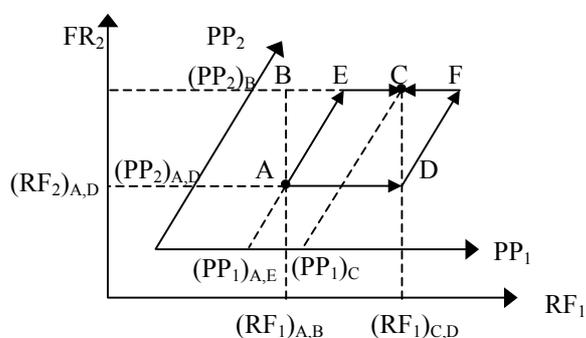


Figura 4.5 – Representação gráfica de uma solução semivinculada

A melhor maneira de alterar os requisitos funcionais do estado A para o estado C neste caso é alterar o PP_2 de $(PP_2)_A$ para $(PP_2)_B$, (note que $(PP_2)_B = (PP_2)_E = (PP_2)_C = (PP_2)_F$) e então alterar o PP_1 de $(PP_1)_E$ para $(PP_1)_C$. Porém, se a ordem de alteração dos PPs for invertida, alterando-se primeiramente o PP_1 , a única forma de alterar os RFs de A para C seria através do caminho A-D-F-C, o qual é mais trabalhoso. Isto se deve ao fato de que toda a vez que o PP_2 for alterado o valor do RF_1 também será. Neste caso existe um reajuste do RF_1 de $(RF_1)_F$ para $(RF_1)_C$. Assim, em soluções semivinculadas a ordem de alteração dos PPs é muito importante,

pois determinará a violação ou não ao primeiro axioma. Um exemplo desta e também dos outros tipos de soluções pode ser visualizado no capítulo 3, item 3.4.

O terceiro tipo de solução denominada solução vinculada segundo a abordagem axiomática, é aquela que viola o primeiro axioma de projeto, devendo portanto ser evitada ou apresentar o menor grau de acoplamento possível. Esta situação é representada graficamente através da Figura 4.6, onde α_1 e α_2 são diferentes entres si e diferentes de zero.

Neste caso, os eixos PP_1 e PP_2 não são ortogonais entre si nem paralelos aos eixos RF_1 e RF_2 , respectivamente. Assim, deve-se percorrer um caminho complexo para alterar o RF_1 de $(RF_1)_A$ para $(RF_1)_C$ e $(RF_2)_A$ para $(RF_2)_C$. Supondo que primeiramente seja alterado o PP_1 visando obter o valor apropriado para o RF_1 , movendo-o de A para C' . Simultaneamente o valor do RF_2 também é alterado de $(RF_2)_A$ para $(RF_2)_{C'}$. Altera-se então o PP_2 de $(RF_2)_{C'}$ para $(RF_2)_C$ visando satisfazer o RF_2 . Porém, como anteriormente, o valor do RF_1 também é alterado de $(RF_1)_{C'}$ para $(RF_1)_{C''}$. Para então corrigir o valor do RF_1 , reajusta-se PP_1 para mover o RF_1 de $(RF_1)_{C''}$ para $(RF_1)_C$. Porém, RF_2 assume novamente um novo valor. Portanto, para alterar os RFs do estado A para C em soluções de projeto vinculadas, os PPs devem ser alterados continuamente até convergir para o ponto C. Tal dificuldade agrava-se quando o número de RFs for elevado.

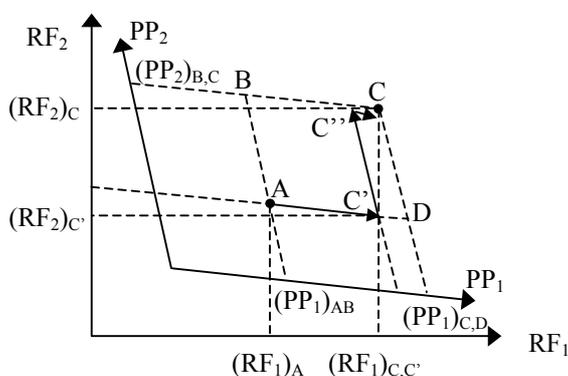


Figura 4.6 – Representação gráfica de uma solução vinculada

Desta forma, verifica-se a importância do paralelismo entre os eixos dos PPs e dos RFs. Mesmo que os eixos dos PPs sejam ortogonais entre si, se eles não forem paralelos aos seus correspondentes eixos dos RFs, a solução de projeto violará o primeiro axioma.

Neste caso, a solução de projeto pode apresentar-se como vinculada (percurso A-B-C) ou semivinculada (percurso A-E-F-C) conforme ilustra a Figura 4.7, mas não será uma solução não vinculada.

Assim, na seqüência deste trabalho serão apresentadas as métricas propostas para mensurar o grau de independência funcional de uma solução de projeto, ilustrado previamente através de representações gráficas para permitir um bom entendimento ao leitor.

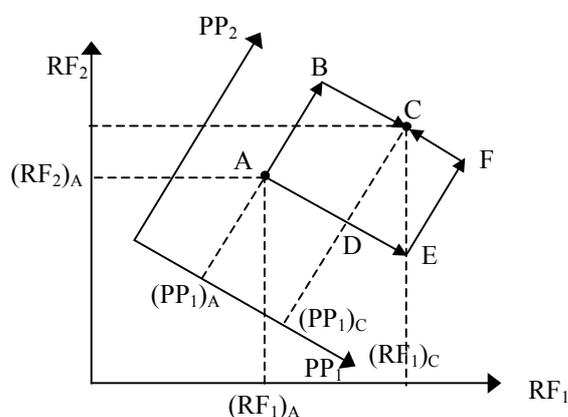


Figura 4.7 – Representação gráfica da importância do paralelismo entre os eixos.

4.3.2 - Métricas de avaliação para o primeiro critério

Na seção anterior o relacionamento entre RFs e PPs foi representado graficamente para o caso bidimensional, para ilustrar o conceito de independência dos RFs.

Com base nesta representação gráfica Suh (1990) propõe duas métricas para avaliar o grau de independência funcional de uma solução de projeto, denominadas *Reangularity* (R) e *Semangularity* (S). Segundo o autor, para caracterizar-se por completo o grau de independência funcional de uma solução de projeto, seja ela vinculada ou semivinculada, deve-se considerar o ângulo entre os eixos que representam os PPs e o alinhamento dos mesmos com os eixos que representam os RFs, expressos por R e S , respectivamente.

A métrica R é utilizada para expressar a ortogonalidade entre os PPs. Conforme mencionado anteriormente, a natureza do mapeamento entre os RFs e os PPs para o caso bidimensional pode ser expressa pela Equação (4.2) que por sua vez pode ser manipulada matematicamente, originando as Equações (4.5), (4.6) e (4.7).

$$RF = C_1 \times PP_1 + C_2 \times PP_2 \quad (4.5)$$

$$C_1 = \left\{ \begin{matrix} A_{11} \\ A_{21} \end{matrix} \right\} \quad (4.6)$$

$$C_2 = \begin{Bmatrix} A_{12} \\ A_{22} \end{Bmatrix} \quad (4.7)$$

Tais equações são representadas pela Figura 4.8 que também ilustra o ângulo entre os PPs, denominado θ e, a partir do qual *Suh* calcula a métrica *reangularity*.

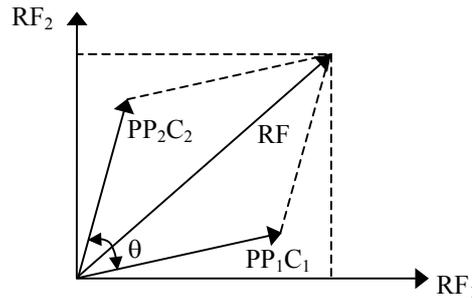


Figura 4.8 – Representação gráfica da equação (4.5)

O ângulo θ pode ser facilmente obtido através da Equação (4.8):

$$\cos \theta = \frac{C_1 \cdot C_2}{|C_1| \cdot |C_2|} \quad (4.8)$$

Suh então define *reangularity* (R) como sendo o seno do ângulo θ , resultando na Equação (4.9)

$$R = \text{sen } \theta = (1 - \cos^2 \theta)^{1/2} \quad (4.9)$$

Para o caso com n -dimensões, ou seja, inúmeros RFs e PPs, o autor a define através da Equação (4.10):

$$R = \prod_{\substack{i=1, n-1 \\ j=1+i, n}} \left(1 - \frac{\left(\sum_{k=1}^n A_{ki} A_{kj} \right)^2}{\left(\sum_{k=1}^n A^2_{ki} \right) \left(\sum_{k=1}^n A^2_{kj} \right)} \right) \quad (4.10)$$

onde A representa os elementos da matriz de projeto. Os somatórios no denominador da Equação (4.10) são os quadrados dos elementos das colunas da matriz de projeto, utilizados para

normalizá-las. Quando as colunas já estiverem normalizadas, o somatório será igual a um.

A equação é definida de forma que o máximo valor da métrica R ocorre quando os eixos forem mutuamente ortogonais. Quando o grau de acoplamento decrescer, o valor de R também decresce.

Assim, a métrica R informa o grau de ortogonalidade entre os PPs, e pode ser utilizada para expressar o grau de independência funcional de uma determinada solução de projeto.

Porém, como definido pelo autor, somente R não caracteriza por completo o grau de independência funcional, sendo necessário também considerar a relação angular entre os correspondentes RFs e PPs, ou seja, o paralelismo entre os eixos. Assim, adicionalmente a R mais uma métrica é necessária para caracterizar completamente a independência funcional. Tal métrica é definida por *Suh* como *semangularity* (S), e definida pela Equação (4.11):

$$S = \prod_{j=1}^n \left(\frac{|A_{jj}|}{\left(\sum_{k=1}^n A^2_{kj} \right)^{1/2}} \right) \quad (4.11)$$

O numerador é um fator normalizador que é igual a um se as colunas da matriz de projeto estiverem normalizadas. Quando a matriz de projeto está normalizada, a métrica S simplesmente trata do produto dos valores absolutos da diagonal principal. Se a matriz projeto estiver adequadamente normalizada, os elementos da diagonal principal serão iguais à unidade e os demais serão nulos. Assim, quando a métrica S é igual a unidade os PPs serão paralelos aos RFs.

Portanto, segundo *Suh* a independência funcional dos RFs é conhecida somente se a relação angular entre os PPs e o alinhamento dos mesmos com seus respectivos RFs estiver definida. R expressa então a relação angular e S o alinhamento, e em uma solução de projeto não vinculada, ambas as métricas R e S serão iguais à unidade. Como ambas as métricas variam de “0 a 1”, a independência funcional será maior quando R e S tenderem à unidade.

Porém, o autor não menciona como devem ser combinadas ou utilizadas tais grandezas de modo a indicarem a melhor alternativa entre diversas soluções de projeto.

Para exemplificar esta afirmação serão consideradas as duas alternativas de projeto ilustradas na Tabela 4.3. Analisando as matrizes de projeto A_1 e A_2 verifica-se que a Alternativa 2 é preferível à Alternativa 1 quando toma-se como critério a métrica R . Porém, tomando-se como critério a métrica S a Alternativa 1 é preferível à 2, ou seja, revela uma situação contraditória. Assim, apesar de R e S demonstrarem o grau de independência funcional, neste caso não revelam qual alternativa deve ser escolhida dentre várias opções.

Tabela 4.3 – Avaliação de alternativas de projeto vinculadas segundo as métricas R e S .

	Alternativa 1	Alternativa 2
Matriz de projeto	$[A_1] = \begin{bmatrix} 0,8 & 0,5 \\ 0,6 & 0,8 \end{bmatrix}$	$[A_2] = \begin{bmatrix} 0,2 & 0,5 \\ 0,1 & 0,8 \end{bmatrix}$
Representação gráfica		
Métricas R e S	$R_1 = 0,36$ $S_1 = 0,67$	$R_2 = 0,52$ $S_2 = 0,36$

Tal impasse pode ser resolvido utilizando-se uma outra forma de medir o grau de independência funcional, conforme proposto por Arcidiacono et al (2001). Diferentemente de *Suh* estes autores propõem outras métricas para avaliar soluções vinculadas e semivinculadas.

Considere-se então uma determinada situação de projeto vinculado onde os RFs e a matriz de projeto $[A]$ estejam pré-estabelecidos, e deve-se estabelecer os PPs para satisfazer os RFs. Tal situação pode ser comparada a um sistema de equações onde tendo-se RF e A deseja-se obter PP (Ver equação (3.1)).

Como os elementos da matriz de projeto possuem unidades físicas diferentes entre si, os valores dos PPs não podem ser encontrados por um único passo de cálculo através de álgebra linear, mas requerem um processo iterativo.

No caso de projetos vinculados o grau de acoplamento é definido como a dificuldade de ajustar os PPs para satisfazer os RFs. Esta dificuldade é medida em função do número de iterações requeridas para resolver o sistema. Entenda-se aqui por iterações a

retroalimentação dos valores dos PPs para satisfazer os RFs. Porém, o cálculo da taxa de convergência do sistema é mais simples por ser inversamente proporcional ao número de interações, e também reflete o grau de acoplamento do sistema.

Então, para calcular a taxa de convergência Arcidiacono et al (2001) propõe a utilização do método de convergência de Jacobi, devido a sua simplicidade.

A equação de projeto (3.1) pode ser reescrita como:

$$b = A \times u \quad (4.12)$$

onde b é o vetor de RFs, A a matriz de projeto e u o vetor PPs.

Para que o método convirja é necessário que o raio espectral¹ da matriz A seja menor que a unidade. Para garantir tal requisito, multiplica-se ambos os lados de (4.12) pela matriz T , descrita por (4.13):

$$T = \begin{bmatrix} 1/A_{ii} & 0 \\ 0 & 1/A_{ii} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

resultando em:

$$b' = A' \times u \quad (4.14)$$

onde, $b' = b \times T$ e $A' = A \times T$. Os elementos “ A_{ii} ” existentes na matriz T são os correspondentes elementos da matriz A .

Adicionando $(I - A') \times u$ em ambos os lados de (4.14), de forma que I seja uma matriz identidade resultará em:

$$b' + (I - A')u = A' \times u + (I - A')u = A' \times u + I \times u - A' \times u \therefore b' + (I - A')u = u \quad (4.15)$$

Assim, no processo de iterações a Equação (4.15) pode ser reescrita como:

$$u^{n+1} = b + G \times u^n \quad (4.16)$$

¹ Raio espectral: Maior dos valores absolutos dos autovalores de uma matriz quadrada.

onde $G = (I - A')$. Desta forma, é possível obter a taxa de convergência, denominada de Tc neste trabalho, utilizando a equação (4.17) definida por Young (1971):

$$Tc = \ln\left(\frac{1}{S_G}\right) \quad (4.17)$$

onde S_G é o raio espectral de G , ou seja, seu máximo auto valor em módulo.

Como a taxa de convergência é inversamente proporcional ao grau de acoplamento funcional do sistema, conclui-se que quanto maior Tc melhor será uma determinada alternativa de projeto. Desta forma, pode-se utilizar tal métrica como critério para seleção.

Aplicando esta formulação ao exemplo citado anteriormente, verifica-se que a Alternativa 2 é preferível à Alternativa 1 pois apresenta um maior valor de Tc , conforme ilustra a Tabela 4.4. Conclui-se então que através da introdução desta métrica à abordagem axiomática obtém-se um critério para seleção de alternativas de projeto, sem ambigüidades.

Tabela 4.4 – Avaliação de alternativas de projeto vinculadas segundo métrica Tc .

	Alternativa 1	Alternativa 2
Matriz de projeto	$[A_1] = \begin{bmatrix} 0,8 & 0,5 \\ 0,6 & 0,8 \end{bmatrix}$	$[A_2] = \begin{bmatrix} 0,2 & 0,5 \\ 0,1 & 0,8 \end{bmatrix}$
Métrica Tc	$Tc_1 = 0,38$	$Tc_2 = 0,58$

Porém, a métrica Tc aplica-se apenas às soluções vinculadas. Para soluções semivinculadas Suh (1990) propõe a utilização das mesmas métricas, R e S . Logo, o mesmo impasse irá surgir.

Analisando as alternativas de projeto representadas pelas matrizes de projeto A_1 e A_2 e ilustradas conforme a Tabela 4.5, verifica-se que a Alternativa 1 é preferível à Alternativa 2 quando toma-se como critério a métrica R . Porém, tomando-se como critério a métrica S a Alternativa 2 é preferível a 1, ou seja, revelando novamente uma situação contraditória. Tal impasse também pode ser resolvido com base nas métricas propostas por Arcidiacono et al (2001).

Para soluções de projeto semivinculadas a matriz de projeto apresenta-se na forma triangular e, diferentemente de soluções de projeto vinculadas, não necessita-se de iterações para

encontrar os valores dos PPs que devam satisfazer os RFs. Como mencionado no capítulo anterior, a definição de independência funcional é diferente para as soluções de projeto semivinculadas, pois elas satisfazem ao axioma da independência se os PPs forem alterados numa seqüência correta. Assim, a métrica Tc não apresenta-se de forma adequada para expressar o grau de independência funcional de soluções semivinculadas.

Tabela 4.5 – Avaliação de alternativas de projeto semivinculadas segundo as métricas R e S .

	Alternativa 1	Alternativa 2
Matriz de projeto	$[A_1] = \begin{bmatrix} 0,9 & 0 \\ 0,6 & 0,8 \end{bmatrix}$	$[A_2] = \begin{bmatrix} 0,5 & 0 \\ 0,4 & 1 \end{bmatrix}$
Representação gráfica		
Métricas R e S	$R_1 = 0,83$ $S_1 = 0,8$	$R_2 = 0,78$ $S_2 = 0,92$

Através da representação gráfica de independência funcional ilustrada no item 4.3.1, percebe-se de maneira simples que quanto menor o ângulo entre um RF e um PP (nulo no caso mais favorável) mais significativa será a influência deste PP sobre o RF. Conseqüentemente, os outros PPs exercerão menor influência sobre este RF e a solução de projeto apresentar-se-á com menor grau de acoplamento. Arcidiacono et al (2001)

Assim, os autores acima citados definem uma métrica diferente para expressar o grau de independência funcional de soluções semivinculadas através da média dos ângulos existente entre cada RF e seu PP. Quanto menor o ângulo entre o RF e seu respectivo PP, menor será o grau de acoplamento do sistema, pois por conseqüência os demais PP exercerão menor influência sobre este RF.

Apesar de os autores dedicarem esta métrica para soluções semivinculadas, esta também pode ser usada para expressar o grau de independência de soluções vinculadas, se desejável, devido ao grau de complexidade da métrica anterior ou impedimento matemático, como por exemplo, a existência de autovalores nulos.

Esta métrica, denominada de ângulo de influência (A_i) neste trabalho, pode ser expressa matematicamente através da Equação (4.18), onde o símbolo “ \angle ” expressa o ângulo entre os vetores.

$$A_i = \frac{\sum_{i=1}^n RF_i \angle PP_i}{n} \quad (4.18)$$

Os vetores dos eixos dos PPs são constituídos das colunas da matriz de projeto, enquanto que os vetores dos eixos dos RFs são formados pelas colunas de uma matriz identidade, uma vez que os RFs, por definição, devem ser independentes entre si.

O ângulo entre os dois vetores, cada um composto de “ n ” elementos pode ser calculado através da Equação (4.19):

$$RF_i \angle PP_i = a \cos \left(\frac{RF_i \cdot PP_i}{|RF_i| |PP_i|} \right) \quad (4.19)$$

Portanto, através de (4.18) mede-se o grau de influência de cada PP sobre seu respectivo RF e tira-se a média desta. Quanto maior esta influência melhor, ou seja, menor o valor da métrica A_i . Obviamente, os elementos da matriz de projeto fora da diagonal principal reduzirão esta influência, aumentando o grau de acoplamento.

Aplicando então esta formulação ao exemplo citado anteriormente, verifica-se que a Alternativa 1 é preferível à Alternativa 2 pois apresenta um menor valor A_i . Os valores das métricas calculados são ilustrados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Avaliação de alternativas de projeto semivinculadas segundo métrica A_i .

	Alternativa 1	Alternativa 2
Matriz de projeto	$[A_1] = \begin{bmatrix} 0,9 & 0 \\ 0,6 & 0,8 \end{bmatrix}$	$[A_2] = \begin{bmatrix} 0,5 & 0 \\ 0,4 & 1 \end{bmatrix}$
Métrica A_i	$A_{i1} = 0,29$	$A_{i2} = 0,34$

Portanto, através da introdução destas métricas Tc e A_i na abordagem axiomática obtêm-se critérios adequados para seleção de alternativas de projeto vinculadas e semivinculadas

em relação ao primeiro axioma. As métricas necessárias para a avaliação com relação ao segundo axioma serão descritas a seguir, no item 4.3.3.

4.3.3 - Métricas de avaliação para o segundo critério

O segundo critério de avaliação é estabelecido com base no axioma da informação: “dentre várias alternativas de projeto, aquela que apresentar o menor conteúdo de informação, será a melhor”.

Suh (1990) define o conteúdo de informações como uma medida da informação necessária para satisfazer um dado RF. Se uma tarefa é estabelecida de modo que possa ser sempre satisfeita sem nenhuma informação prévia, então a probabilidade de sucesso é igual à unidade e a informação requerida será nula. De fato, quando se realiza um projeto objetiva-se sempre prover a quantidade apropriada de informação de forma que a probabilidade de solucionar um problema/tarefa seja tanto maior quanto possível, embora geralmente seja menor que a unidade. Uma vez que a probabilidade de sucesso depende da complexidade do problema, o conceito de informação está relacionado com o conceito de complexidade (Suh, 1990).

O conteúdo de informações das soluções vinculadas e semivinculadas não pode ser determinado da mesma forma que o conteúdo de informações das soluções não vinculadas, pois as inter-relações existentes entre as funções conduzirão a diferentes valores (Frey et al, 2000) e (Suh, 1990).

Suh (1990) propõe apenas uma métrica para determinar o conteúdo de informações de soluções não vinculadas e, devido à sua simplicidade, será apenas apresentada no presente trabalho de maneira a facilitar o entendimento do leitor. A métrica a ser utilizada neste trabalho será a métrica proposta por Frey et al (2000), que destina-se originalmente a determinar o conteúdo de informações das alternativas de projeto vinculadas e semivinculadas, mas também permite o cálculo do conteúdo de informações das alternativas não vinculadas.

Considerando o mesmo exemplo ilustrado no capítulo 3, item 3.3.4, onde se deseja medir o comprimento de uma barra cilíndrica, pode-se adquirir uma melhor compreensão e desenvolver uma métrica apropriada para o conteúdo de informações. Um modo de satisfazer o comprimento requerido de $L \pm (\Delta L/2)$ é medir a barra cilíndrica utilizando um bloco calibre com medida ΔL . Medindo a barra como n incrementos do bloco calibre, onde n é um inteiro mais próximo de $L/\Delta L$, obter-se-á a medida dentro da tolerância especificada de $\pm (\Delta L/2)$. Porém a

incerteza na medida aumenta com o aumento de n . Quando $L = \Delta L$ a incerteza associada à contagem de n é menor que a unidade, mas quando $L = 1000\Delta L$ a chance de cometer um erro é 1000 vezes maior. Logo, pode-se definir o conteúdo de informações I como:

$$I = n = \frac{L}{\Delta L} \quad (4.20)$$

Conclui-se então que a probabilidade de cometer um erro no processo de medição através do bloco calibre é proporcional ao número total de incrementos, n . Assumindo uma distribuição uniforme a probabilidade que o comprimento requerido esteja dentro da tolerância especificada é dada por $\Delta L/L$. Observando a Equação (4.20) conclui-se que o conteúdo de informações é inversamente proporcional à probabilidade de sucesso “ p ”, ou seja:

$$I = \frac{1}{p} \quad (4.21)$$

Segundo Suh (1990) e Nakazawa (1994) assumir uma distribuição uniforme de probabilidade satisfaz a maioria dos casos, pois aplica-se à fase de projeto conceitual onde ainda persiste um elevado grau de abstração das informações.

Porém, a Equação (4.21) requer que o conteúdo de informações de eventos separados como, por exemplo, a existência de vários requisitos funcionais, seja multiplicado ao invés de adicionado. Isto opõe-se à compreensão intuitiva de complexidade. Por exemplo, quando deseja-se medir ao longo de dois eixos de coordenadas, a complexidade deveria ser a soma da complexidade dos dois eventos e não o produto delas.

Uma melhor abordagem para computar o conteúdo de informações é proposta por Shannon (1948) *apud* Suh (1990) onde o conteúdo de informações é definido como o logaritmo do inverso da probabilidade:

$$I = \log_2 \left(\frac{1}{p} \right) \quad (4.22)$$

Baseado nesta definição o conteúdo de informações total de uma solução de projeto será a soma das informações associadas a cada requisito funcional e será nulo quando a probabilidade for igual à unidade. A base do logaritmo da Equação (4.22) é definida como dois

para obter-se a unidade de “bits” para o conteúdo de informações. Assim, neste modelo o conteúdo total de informações é a soma dos eventos individuais e não a multiplicação.

Conclui-se então que o conteúdo de informação é uma medida da probabilidade de sucesso de satisfazer os RFs estabelecidos. Os RFs são as metas que a solução de projeto deve satisfazer e os PPs os meios para satisfazê-los. Isto pode ser ilustrado graficamente através da Figura 4.9 onde o limite de projeto é definido com base nos RFs e suas tolerâncias, e o limite de sistema definido através do PPs e suas tolerâncias.

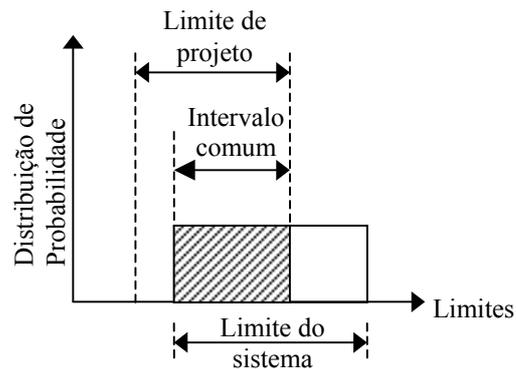


Figura 4.9 – Ilustração gráfica do conteúdo de informações.

O conteúdo de informações é então determinado com base na sobreposição destes limites, ilustrado através da área sombreada na Figura 4.9. Assim, a definição de conteúdo de informação dada pela Equação (4.22) pode ser rescrita como:

$$I = \log_2 \left(\frac{\text{Limite do sistema}}{\text{Intervalo comum}} \right) \quad (4.23)$$

Para exemplificar a utilização desta métrica, considera-se como exemplo as alternativas de projeto não vinculadas ilustradas na Tabela 4.7. Através da Equação (4.23) calcula-se então a quantidade de informações de cada alternativa de projeto. Os valores obtidos estão descritos na Tabela 4.8 e a forma como calculá-los é descrita através do exemplo, onde calcula-se a métrica I referente ao RF₁ da alternativa de projeto A, ilustrado pela Figura 4.10 e pela Equação (4.24).

$$I_{1,A} = \log_2 \left(\frac{40 - 20}{30 - 20} \right) = 1 \quad (4.24)$$

Tabela 4.7 – Avaliação de alternativas de projeto não vinculadas segundo métrica I.

		RF ₁		RF ₂		RF ₃		RF ₄	
		min	max	min	max	min	Max	min	max
Meta		15	30	65	-	340	-	-	650
Alternativas	A	20	40	50	70	300	320	450	550
	B	20	30	50	75	340	350	450	650
	C	25	45	50	80	350	-	600	800

Tabela 4.8 – Valores da métrica I para cada alternativa de projeto.

	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	Σ
A	1	2	∞	0	∞
B	0	1,32	0	0	1,32
C	2	1	0	2	5

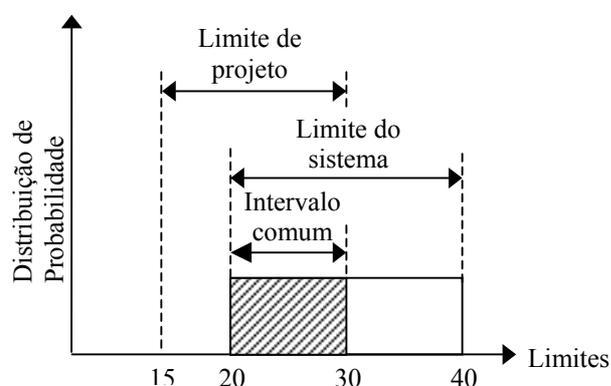


Figura 4.10 – Representação gráfica para o cálculo do conteúdo de informações.

Analisando os valores da Tabela 4.8 verifica-se que a alternativa B apresenta o menor conteúdo de informações e, desta forma, como a melhor alternativa dentre as demais.

Porém, conforme mencionado anteriormente, o conteúdo de informações das soluções vinculadas e semivinculadas não pode ser determinado da mesma forma que o conteúdo de informações das soluções não vinculadas. Para determiná-los, será utilizada a métrica proposta por Frey et al (2000), que também pode ser utilizada para determinar o conteúdo de informações das alternativas de projeto não vinculadas.

De modo semelhante a Suh (2000) Frey et al (2000) propõe a determinação do conteúdo de informações como uma medida da probabilidade de sucesso de satisfazer os RFs. Nas soluções de projeto do tipo não vinculadas cada RF é afetado somente por seu respectivo PP. Porém, nas soluções de projeto do tipo vinculadas e semi-vinculadas deve-se considerar a influência dos demais PPs sobre o RF em análise.

Visando estimar o conteúdo de informações considerando tal influência, será considerada a situação onde existam apenas dois PPs, os quais sejam probabilisticamente independentes e uniformemente distribuídos ao longo de suas especificações. Neste caso, a função densidade de probabilidade conjunta é uniformemente distribuída ao longo da faixa delimitada pelas tolerâncias do sistema.

Por definição, o limite de projeto pode ser descrito como um conjunto de pontos no espaço de parâmetros de projeto que satisfaçam todas as tolerâncias dos RFs. Se a tolerância bilateral do j-ésimo RF for representada como δRF_j , então cada tolerância de projeto pode ser representada por duas restrições na forma de desigualdades lineares. Estas restrições juntas definem o limite de projeto conforme ilustra a Figura 4.11 formando um poliedro n-dimensional, podendo ter ou não volume finito. As equações ilustradas na Figura 4.11 são oriundas da Equação (3.1) e foram trabalhadas matematicamente visando estabelecer os PPs em função dos RFs.

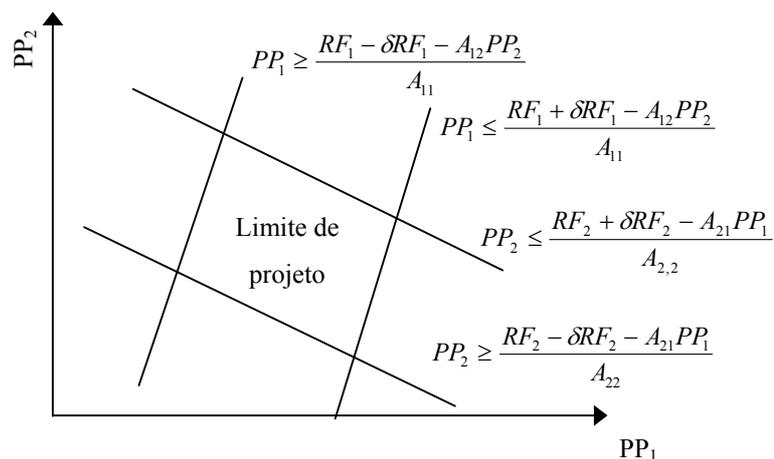


Figura 4.11 – Representação do limite de projeto de soluções vinculadas através de poliedros convexos no espaço bidimensional.

Cabe salientar que a Figura 4.11 ilustra o limite de projeto para soluções do tipo vinculadas. Para soluções semi-vinculadas, uma situação semelhante seria obtida, diferenciando-

se apenas na inclinação das retas que delimitam o limite de projeto, ou seja, um dos pares de retas que delimitam o limite de projeto seriam paralelas a um dos eixos.

Conforme mencionado no capítulo 3 deste trabalho, a equação (3.1) assume um comportamento de projeto linear ao longo do limite do sistema e pode ser entendida como um mapeamento entre PPs e RFs. Sobre estas condições, o limite de projeto pode ser definido como um conjunto delimitado por um sistema de desigualdades e descrito matematicamente através da Equação (4.25).

$$\text{Limite de projeto} = \left\{ PP \begin{bmatrix} A \\ -A \end{bmatrix} \cdot PP \leq \begin{bmatrix} \tau RF + \delta RF \\ -\tau RF + \delta RF \end{bmatrix} \right\} \quad (4.25)$$

De modo semelhante ao limite de projeto, o limite do sistema também pode ser descrito como um conjunto de pontos no espaço de parâmetros de projeto determinado em função das tolerâncias do sistema que será utilizado para satisfazer os RFs e, é determinado da mesma forma. Assim, se a especificação bilateral do i -ésimo PP for representada como ΔPP_i , o limite do sistema será um retângulo com lados iguais a $2\Delta PP_i$.

A intersecção do limite do sistema e do limite de projeto definirá o intervalo comum, o qual também será um poliedro n -dimensional, tendo um volume finito menor ou igual ao volume do sistema. A Figura 4.12 ilustra o limite do sistema, o limite de projeto e o intervalo comum, utilizados para o cálculo do conteúdo de informações de uma solução de projeto.

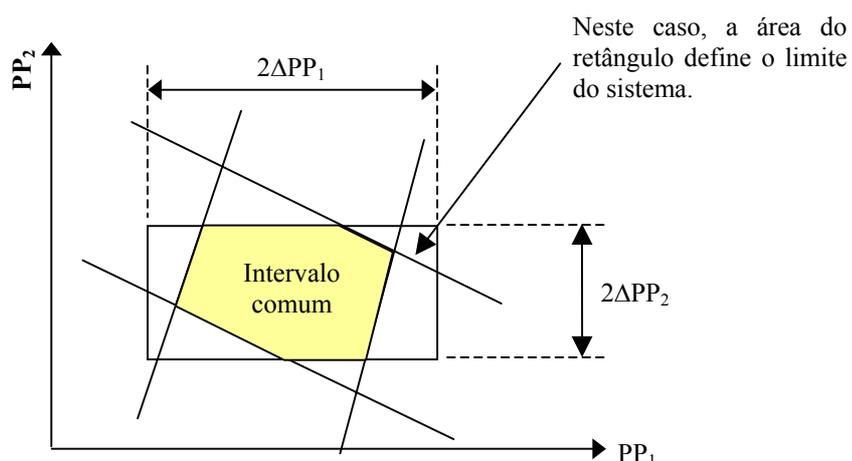


Figura 4.12 – Representação do limite do sistema e do intervalo comum.

Logo, o conteúdo de informações de uma alternativa de projeto cujos PPs possuam distribuição uniforme de probabilidade pode ser calculado como o logaritmo dos

volumes de dois poliedros n -dimensionais, onde n expressa o número de PPs e $V()$ representa o volume de um conjunto em um espaço n -dimensional.

$$I = \log\left(\frac{V(\text{limite do sistema})}{V(\text{intervalo comum})}\right) \quad (4.26)$$

A Equação (4.26) pode ser entendida como uma extensão no espaço n -dimensional da Equação (4.23) determinada por Suh (1990), onde os valores dos PPs, determinados em função das tolerâncias dos RFs e da matriz de projeto, definirão o limite de projeto e, quando obtidos através da capacidade do sistema, definirão o limite do sistema.

Para avaliar a Equação (4.26) deve-se calcular o volume do sistema e o volume do intervalo comum. O volume que descreverá o limite do sistema na forma de um poliedro convexo em \mathfrak{R}^n pode ser obtido através da Equação (4.27), onde a tolerância bilateral do i -ésimo PP é representada como ΔPP_i .

$$V(\text{limite sistema}) = \prod_{i=1}^n 2\Delta PP_i \quad (4.27)$$

Para automaticamente calcular o volume do intervalo comum, será utilizado o teorema proposto por Lasserre (1983). Dado um poliedro convexo definido pelo conjunto de desigualdades lineares $Ax \leq b$, o volume de um poliedro convexo que satisfaça tais desigualdades é determinado pela Equação (4.28):

$$V(n, A, b) = \frac{1}{n} \sum \frac{b_p}{|A_{pq}|} \times V\left(n-1, \tilde{A}, \tilde{b}\right) \quad (4.28)$$

onde $\tilde{A}x \leq \tilde{b}$ é o sistema resultante da remoção de x_q do sistema $Ax \leq b$ considerando a p -ésima desigualdade como uma igualdade.

Para utilizar a Equação (4.28) para calcular o volume do intervalo comum é necessário formular uma representação matemática do mesmo como um conjunto de restrições na forma de desigualdades lineares. Isto pode ser obtido acrescentando-se as restrições que definem o limite do sistema à Equação (4.25), a qual define o volume do limite de projeto. A

Equação (4.29) determina então o intervalo comum, onde I é a matriz identidade de orden $n \times n$ e μ_{PP} é um vetor com os valores médios dos PPs.

$$\text{Intervalo comum} = \left\{ PP \begin{bmatrix} A \\ -A \\ I \\ -I \end{bmatrix} \cdot PP \leq \begin{bmatrix} \tau_{RF} + \delta_{RF} \\ -\tau_{RF} + \delta_{RF} \\ \mu_{PP} + \Delta_{PP} \\ -\mu_{PP} + \Delta_{PP} \end{bmatrix} \right\} \quad (4.29)$$

Caso as tolerâncias de projeto não sejam simétricas, ou seja, o limite inferior apresentar-se diferente do limite inferior, utiliza-se a mesma formulação acima, diferenciando apenas as tolerâncias como descrito na equação (4.29a).

$$\text{Intervalo comum} = \left\{ PP \begin{bmatrix} A \\ -A \\ I \\ -I \end{bmatrix} \cdot PP \leq \begin{bmatrix} \tau_{RF} + \delta_{RF_s} \\ -\tau_{RF} + \delta_{RF_i} \\ \mu_{PP} + \Delta_{PP_s} \\ -\mu_{PP} + \Delta_{PP_i} \end{bmatrix} \right\} \quad (4.29a)$$

Além do exposto neste trabalho através da equação (4.29), existem muitos outros algoritmos na literatura para calcular o volume de poliedros convexos. O método de Lasserre (1983), foi escolhido por sua simplicidade conceitual e eficiência computacional. (Frey et al, 2000).

Assim, as Equações (4.25) a (4.29) fornecem uma visão geral do algoritmo para calcular o conteúdo de informações de soluções vinculadas e semivinculadas com PPs distribuídos uniformemente. Para implementação prática, existe um maior número de detalhes. Tais detalhes juntamente com o algoritmo para o cálculo do intervalo comum são ilustrados no capítulo 5 deste trabalho.

De maneira a exemplificar a utilização desta métrica serão consideradas como exemplo as alternativas de projeto vinculadas ilustradas na Tabela 4.9. Pretende-se então estimar o conteúdo de informações de cada alternativa utilizando a nova métrica proposta, com o objetivo de verificar qual apresenta o menor conteúdo de informações. Na Tabela 4.9 são ilustradas as informações necessárias para tal, ou seja, as tolerâncias requeridas pelo projeto na forma de metas a serem atingidas, ou seja, os RFs, a matriz de projeto com as relações de dependência entre RFs e PPs e, por fim, os PPs e tolerâncias das duas alternativas propostas.

Tabela 4.9 – Exemplo de alternativas de projeto segundo a abordagem axiomática.

Metas de projeto	RF ₁		RF ₂	
	Meta	Tolerância	Meta	Tolerância
	80	± 10	50	± 6
Matriz de projeto	1		0,9	
	0,4		1	
Alternativa A	PP ₁		PP ₂	
	Média	Tolerância	Média	Tolerância
	55	± 9	30	± 8
Alternativa B	PP ₁		PP ₂	
	Média	Tolerância	Média	Tolerância
	45	± 6	35	± 5

Através da utilização da Equação (4.26) calcula-se o conteúdo de informações das soluções propostas. O resultado é ilustrado na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Conteúdo de informação e representação do intervalo comum das alternativas ilustradas na Tabela 4.9.

	Alternativa A	Alternativa B
I	0,545	0,465
Representação gráfica		
Tracejado: limite de projeto. Linha cheia: limite do sistema.		

Analisando os valores da Tabela 4.10 verifica-se que a alternativa A apresenta o menor conteúdo de informações, pois apresenta um maior intervalo comum e, desta forma, como a melhor alternativa quando comparada à alternativa B.

O cálculo do conteúdo de informações conforme proposto acima não apresenta restrições de aplicação, podendo ser usado para soluções vinculadas, semivinculadas e não vinculadas. Como descrito anteriormente, a métrica para medir o conteúdo de informações proposta por Suh (1990) apresenta-se de forma coerente, porém podendo ser aplicada somente as soluções não vinculadas. Logo, neste trabalho será utilizado o método acima descrito para o cálculo do conteúdo de informações, por não apresentar limitações de aplicação.

Portanto, através da introdução do novo método para o cálculo da métrica I e da introdução das métricas T_c e A_i à abordagem axiomática, obtém-se critérios adequados para seleção de alternativas de projeto, sejam elas vinculadas, semivinculadas ou não vinculadas.

Contudo, tão importante quanto o cálculo das métricas de avaliação é o preenchimento da matriz de projeto, que descreve as relações de vínculo entre os RFs e os PPs. A seguir serão então descritas algumas orientações para o seu preenchimento.

4.4 - Preenchimento da matriz de projeto

Para avaliar as métricas propostas anteriormente, a matriz de projeto deve ser expressa numericamente.

Suh (1990) sugere a determinação da matriz de projeto experimentalmente ou através de equações matemáticas que descrevam o relacionamento físico entre RFs e PPs. Com base nos resultados destes experimentos ou equações, seria então possível preencher a matriz de projeto. Porém, isto nem sempre é possível, especialmente para níveis hierárquicos elevados, comuns à fase de projeto conceitual. Quando este for o caso, torna-se necessário averiguar a extensão das interações entre RFs e PPs de outra forma.

Neste trabalho, sugere-se então duas formas de preenchimento: através de avaliações analíticas e através de avaliações subjetivas.

4.4.1 - Preenchimento através de avaliações subjetivas

Schlink (2001) em um trabalho visando estimar o custo de produtos a partir de sua estrutura de funções sugere um método visando suportar o julgamento subjetivo quando

relaciona-se funções do produto aos custos de seus componentes por meio de matrizes. Segundo Schlink (2001), estruturar a tarefa final (atribuir valores aos relacionamentos entre funções e custos) em subtarefas menos complexas, reduz a subjetividade e a complexidade da tarefa do avaliador.

O método estabelece que os elementos que irão constituir a matriz sejam normalizados, de modo que seu somatório seja igual à unidade. Assim garante-se que a função do produto estará 100% distribuída aos componentes que a satisfazem, diluindo seu custo. Além disso, cada elemento da matriz que relaciona custo do componente à função deve ser decomposto em outros elementos, de forma a segregar o custo do componente. O avaliador estima então a parcela de consumo ou utilização do componente que cada função exige.

Apesar de não ter sido concebido para aplicações direcionadas à abordagem axiomática, o método apresenta grande potencialidade de aplicação. Dentre as vantagens do método sugerido pelo autor, destacam-se a estruturação/divisão dos elementos em “sub-elementos” visando reduzir a complexidade da tarefa e a normalização dos mesmos, garantindo a correta distribuição do custo.

Arcidiacono et al (2001), pesquisadores da abordagem axiomática, também sugerem o estabelecimento de um método com base em julgamentos subjetivos, visando relacionar funções e soluções do produto. O objetivo dos autores é avaliar a extensão das interações entre RFs e PPs. O método sugere o preenchimento da matriz de projeto inicialmente pelos elementos da diagonal principal, atribuindo-se um valor normalizado igual a “1”. Os demais elementos são então obtidos pelo julgamento do avaliador, tendo por base o valor normalizado.

As vantagens deste método consistem em reduzir a tarefa do avaliador através da normalização dos elementos da diagonal principal e priorizar a satisfação do primeiro axioma, pois inicialmente são preenchidos os elementos da diagonal principal, revelando um projeto sem interações ou vínculos, ou seja, cada RF será satisfeito por seu único PP. Posteriormente, descrevem-se as interações (caso existirem) entre os demais PPs e o RF em questão. Quanto maior o número de interações menor o atendimento ao primeiro axioma.

A forma de preencher a matriz de projeto sugerida neste trabalho utilizará algumas das potencialidades dos métodos acima sugeridos.

Caso disponha-se de informação adequada e experimentos, pode-se determinar a matriz de projeto experimentalmente. Caso isto não seja possível, sugere-se preencher a matriz de projeto atribuindo-se um valor máximo aos elementos da diagonal principal, pois cada PP é

destinado a atender seu respectivo RF. Assim, quando não existirem interações, atribuir-se-á o valor “1”.

Quando existirem interações, deve-se atribuir valores aos elementos externos a diagonal principal tendo por base o valor máximo “1”, e posteriormente descontar a soma destes elementos do valor da diagonal principal, que era igual a “1”. Ou seja, cada linha da matriz de projeto respeitará a Equação (4.30), onde “A” representa seus elementos, tendo a soma de destes iguais a unidade.

$$\sum_{j=1}^n A_{ij} = 1 \quad (4.30)$$

4.4.2 - Preenchimento através de avaliações analíticas

O preenchimento da matriz de projeto na forma analítica é realizado através de equações ou modelos matemáticos que descrevem a relação entre o RF e os PPs, ou seja, como as soluções do projeto afetarão as metas do projeto.

Considera-se este método como o mais adequado para o preenchimento da matriz de projeto, pois sabe-se que avaliações subjetivas estão associadas às percepções individuais dos membros da equipe de projeto e, portanto podem não ser eficazes.

Quanto ao método subjetivo, sugere-se sua utilização quando apenas uma avaliação preliminar necessita ser realizada. Em avaliações onde seja requerido um maior nível de assertividade, sugere-se o método analítico.

Neste trabalho, optou-se pelo método analítico como método para determinar a matriz de projeto, ilustrada no capítulo 6 deste trabalho.

4.5 - Conjunto de atividades para a seleção de concepções alternativas por meio da abordagem axiomática

Um breve resumo do processo de seleção de concepções alternativas proposto neste trabalho é ilustrado pela Figura 4.13.

Primeiramente deve-se estabelecer os RFs do projeto a ser realizado e os PPs que serão utilizados para solucioná-lo. Posteriormente descrevem-se as interações existentes entre os RFs e PPs, através da matriz de projeto, podendo-se obter três classificações para as soluções propostas: não vinculadas, semivinculadas e não vinculadas.

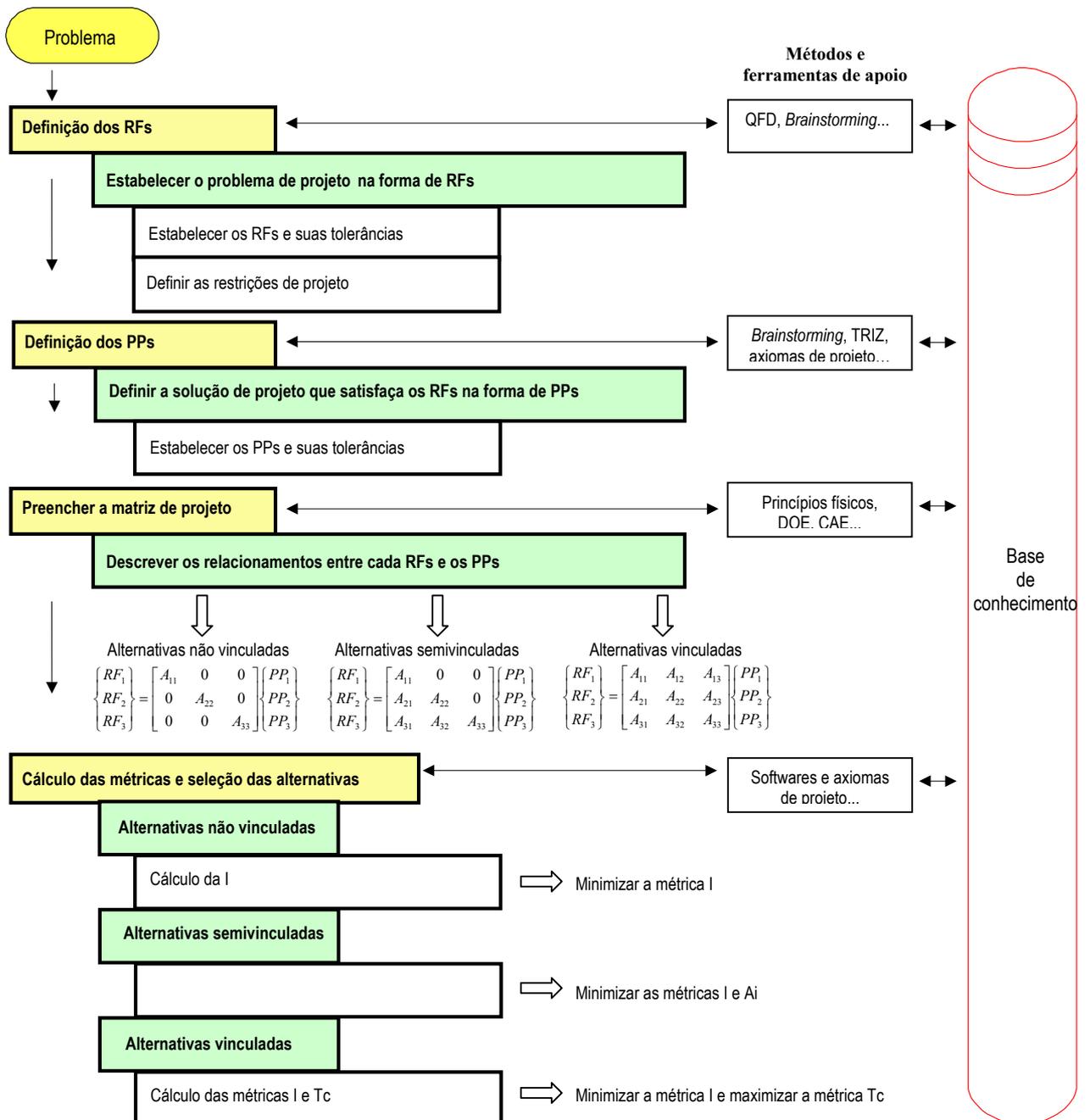


Figura 4.13 – Resumo do processo de seleção de concepções proposto.

Em cada classificação, calculam-se as métricas conforme indicado na Figura 4.13. Dentre as três classificações das soluções, a ordem de preferência a ser seguida na escolha é: soluções não vinculadas, semivinculadas e por último as soluções vinculadas. Caso exista mais de uma alternativa para cada classificação, serão utilizadas as respectivas métricas para selecionar a(s) melhor(es) alternativa(s) para solucionar o projeto.

Desta forma, ao final das atividades ter-se-á a indicação de qual ou quais alternativas de projeto apresentam-se adequadas para solucionar o problema em análise.

4.6 - Considerações finais

Neste capítulo a abordagem axiomática foi analisada visando sua aplicação no processo de tomada de decisões pertinentes à seleção de concepções alternativas da fase de projeto conceitual de produtos.

Através do capítulo anterior e deste que se apresenta, identificou-se que os axiomas de projeto são considerados como medidas da qualidade do projeto, mas a forma como se apresentavam, seja por definição ou por carência de métricas para mensurá-los, impedia a sua aplicação em determinadas situações de projeto, como por exemplo nos casos onde a satisfação do primeiro axioma não pode ser atingida.

Verificou-se então a necessidade de restabelecer os axiomas e as métricas utilizadas para mensurar seu atendimento. Os axiomas foram redefinidos na forma de critérios ou metas a serem otimizadas, e pela introdução das novas métricas, conseguiu-se expressar adequadamente o seu maior ou menor atendimento. Em suma, foram introduzidos critérios adequados para seleção entre alternativas vinculadas e semivinculadas, no que se refere ao primeiro axioma, e a possibilidade de avaliar soluções vinculadas e semivinculadas com relação ao segundo axioma, tarefa esta até então não realizada pela ausência de métricas apropriadas.

Tais métricas existiam previamente na literatura, mas de forma isolada. Neste trabalho, foram agrupados na forma de um conjunto de atividades visando suportar as decisões a serem tomadas no processo de seleção de alternativas de projeto e, sendo assim, uma das contribuições deste trabalho.

Foram sugeridas também orientações para o preenchimento da matriz de projeto, a qual descreve as interações entre RFs e PPs e serve de base para a determinação do atendimento ao critério de independência funcional. Por fim, ilustrou-se um conjunto de atividades na forma de um diagrama, visando transmitir uma visão holística ao leitor do processo de seleção de alternativas de projeto através da abordagem axiomática.

No capítulo que segue descreve-se a ferramenta computacional elaborada, tendo por objetivo usufruir das potencialidades computacionais, agilizando o processamento das informações e a tomada de decisão diante dos resultados do processamento. Tal ferramenta também será utilizada no estudo de caso deste trabalho, ilustrado no capítulo 6.

5 - IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

*“Mais importante que saber usar,
é saber para que serve.”
(Valdeon Sozo)*

5.1 - Introdução

No capítulo 4 foram definidas as métricas a serem introduzidas à abordagem axiomática visando selecionar concepções alternativas durante a fase de projeto conceitual de produtos. Porém, os procedimentos matemáticos necessários para calcular tais métricas exigem certo conhecimento específico e demandam tempo à equipe de projeto.

Visando suportar esta atividade, este capítulo descreve a ferramenta computacional elaborada, a qual permitirá o cálculo automático das métricas, sendo necessário apenas fornecer os dados de entrada do projeto.

A implementação computacional dos procedimentos matemáticos para o cálculo das métricas foi realizada no software MathCad, versão 2000 Professional. A escolha por tal software é justificada devido à:

- disponibilidade de recursos matemáticos necessários para o cálculo das métricas, tais como operações com matrizes;
- utilização de comandos que envolvem decisões e ciclos controlados;
- número expressivo de usuários;
- facilidade de utilização e aprendizado;

A seguir, descreve-se a ferramenta computacional e os algoritmos gerados para computar as métricas mencionadas no capítulo 4.

5.2 - Descrição da ferramenta computacional

Os dados necessários para que seja possível determinar as métricas que serão utilizadas no processo de seleção das concepções alternativas, são inseridos através da tela do

programa, ilustrada na Figura 5.1.

Os primeiros dados a serem fornecidos são os requisitos funcionais do projeto e as tolerâncias associadas a cada um destes. Estes devem ser informados na primeira matriz ilustrada na Figura 5.1, e vista em detalhes na Figura 5.2. Na primeira coluna desta matriz são inseridos os valores médios ou “valores meta” dos RFs. Nas duas colunas seguintes, insere-se a tolerância superior e tolerância inferior de cada RF. Caso seja necessário um maior número de RF basta inserir novas linhas na matriz. Os índices dos elementos matrizes são ilustrados em suas extremidades, iniciando em “0”, ou seja, o primeiro elemento de cada matriz será A_{00} .

FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA SELEÇÃO DE CONCEPÇÕES ALTERNATIVAS
Elaborado por: Valdeon Sozo

Definição dos RF's

Requisito Funcional	Tolerância Superior	Tolerância Inferior
0	10	1
1	25	2
2		
3		
4		
5		

Definição da Matriz de Projeto

	0	1	2	3	4	5
0	1	0				
1	0.5	1				
2						
3						
4						
5						

Definição dos PP's

Parâmetro de Projeto	Tolerância Superior	Tolerância Inferior
0	10	1
1	20	2
2		
3		
4		
5		

Resultado das métricas

Métrica I => I = 0.093menor melhor!
Métrica Ai => Ai = 0.232menor melhor!
Métrica Tc => Tc = "Utilizar a métrica Ai"maior melhor!

Este trabalho é parte integrante de uma dissertação de mestrado.
Para maiores informações favor consultar: Sozo, V. *Utilização da Abordagem Axiomática no processo de tomada de decisões pertinentes ao Projeto Conceitual de Produtos*. Dissertação.UFSC. Florianópolis, 2002.

Figura 5.1 – Tela de apresentação da ferramenta computacional.

Após fornecidos os valores meta do projeto na forma de RFs, deve-se fornecer os parâmetros de projeto, ou seja, os valores que serão utilizados para satisfazer os requisitos funcionais. Estes são inseridos na terceira matriz, ilustrada na Figura 5.1 e detalhada na Figura 5.3. Da mesma forma que os RFs, na primeira coluna desta matriz são inseridos os valores médios ou “valores meta” dos PPs. Nas duas colunas seguintes, insere-se a tolerância superior e tolerância inferior de cada PP. Caso seja necessário um maior número de PPs, basta inserir novas

linhas na matriz. Deve-se lembrar que o número de linhas preenchidas desta matriz deve ser igual ao número de linhas preenchidas na matriz dos RFs, ou seja, o número de RFs deve ser igual ao número de PPs.

Definição dos RF's

	Requisito Funcional	Tolerância Superior	Tolerância Inferior
	0	1	2
0	10	1	1
1	25	2	2
2			
3			
4			
5			

Figura 5.2 – Matriz de coleta de dados sobre os requisitos funcionais.

Definição dos PP's

	Parâmetro de Projeto	Tolerância Superior	Tolerância Inferior
	0	1	2
0	10	1	1
1	20	2	2
2			
3			
4			
5			

Figura 5.3 – Matriz de coleta de dados sobre os parâmetros de projeto.

Uma vez preenchidos os RFs e PPs deve-se preencher a matriz de projeto, que descreve as relações existentes entre os RFs e PPs. Esta matriz é ilustrada na parte central da Figura 5.1 e em detalhes na Figura 5.4. Esta matriz poderá ter seu número de linhas e colunas alterado em função do número de RFs, porém, apresentando-se sempre na forma de uma matriz quadrada, pois o número de RF é igual ao número de PPs.

Definição da Matriz de Projeto

	0	1	2	3	4	5
0	1	0				
1	0.5	1				
2						
3						
4						
5						

Figura 5.4 – Matriz de projeto.

Cabe salientar que a ordem de entrada dos dados não necessita ser informada da forma como mencionada ao longo do texto, ou seja, a seqüência de inserção dos dados não exercerá influência no resultado final. A ordem na qual os dados foram mencionados refere-se à ordem das atividades do processo de projeto, ou seja, definem-se os RFs, posteriormente os PPs que irão satisfazer estes e, por último, os relacionamentos existentes entre eles. Uma vez inseridos todos os dados necessários pode-se facilmente visualizar o resultado das métricas e avaliar a solução analisada. Para avaliar uma nova solução, repete-se o processo.

A região inferior da Figura 5.1 ilustra os resultados obtidos em função dos dados fornecidos, vistos também em detalhes na Figura 5.5. Nesta figura indica-se também o sentido de otimização de cada métrica, ou seja, se deve ser minimizada ou maximizada e, através destas pode-se então realizar a seleção dentre as soluções alternativas.

Resultado das métricas

Métrica I => I = 0.093menor melhor!
 Métrica Ai => Ai = 0.232menor melhor!
 Métrica Tc => Tc = "Utilizar a métrica Ai".....maior melhor!

Figura 5.5 – Resultado das métricas

5.3 - Algoritmos utilizados no cálculo das métricas

5.3.1 - Algoritmo para o cálculo da métrica I

Abaixo ilustra-se o algoritmo utilizado para o cálculo do conteúdo de informações. Trata-se da implementação computacional das Equações (4.25) a (4.29), adaptado de Frey et al (2000).

Cálculo da Métrica I

Construção da matriz preliminar

```
Ordem := cols(A)
Id := identity(Ordem)
A_1 := stack(stack(A, -A), stack(Id, -Id))
```

Construção do vetor b

```
B(pega_repeticao) :=
  linha ← 0
  for i ∈ 0..pega_repeticao - 1
    | V_linha ← RF_Ti,1
    | V_linha+Ordem ← RF_Ti,2
    | linha ← linha + 1
  linha ← linha + Ordem
  for i ∈ 0..pega_repeticao - 1
    | V_linha ← PP_Ti,1
    | V_linha+Ordem ← PP_Ti,2
    | linha ← linha + 1
  linha ← linha + 1
  V
```

Construção da matriz final para cálculo de I

```
A_2 := augment(A_1, B(Ordem))
```

Cálculo dos DPP

```
ΔPP :=
  Produto ← 1
  for i ∈ 0..Ordem - 1
    | Δ ← PP_Ti,1 + PP_Ti,2
    | Produto ← Produto · Δ
  Produto
```

Algoritmo para o cálculo de I

```
n := Ordem    m := Ordem
```

Define the sensitivity matrix.

```
ORIGIN:=1    COMMENT:=0    not(x) :=
  | 1 if x=0
  | 0 otherwise
```

Continuação do algoritmo para o cálculo da métrica A_i .

Define the sensitivity matrix.

ORIGIN:= 1 COMMENT:= 0 not(x) := $\begin{cases} 1 & \text{if } x = 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$

$V(m,n,C) :=$ if $n > 1$

for $i \in 2..m$

same \leftarrow not $\left[\prod_{i2=1}^{i-1} \text{not} \left[\left[(C^T)^{\langle i \rangle} \right] \cdot \left[(C^T)^{\langle i2 \rangle} \right] = \left[(C^T)^{\langle i2 \rangle} \right] \cdot \left[(C^T)^{\langle i \rangle} \right] \right] \right]$

$\left(\begin{array}{l} \text{for } j \in 1..n+1 \text{ if same} \\ C_{i,j} \leftarrow 0 \end{array} \right)$

$\left[\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^m \left[\begin{array}{l} \text{for } j_elim \in 1..n \\ \text{break if } C_{i,j_elim} \neq 0 \\ 0 \text{ if } C_{i,j_elim} = 0 \\ \text{otherwise} \\ \text{for } i2 \in 1..m \\ \left[\begin{array}{l} Cp_{i2,n} \leftarrow C_{i2,n+1} - \left(C_{i2,j_elim} \cdot \frac{C_{i,n+1}}{C_{i,j_elim}} \right) \\ \text{for } j \in 1..n-1 \\ Cp_{i2,j} \leftarrow \left[\begin{array}{l} C_{i2,j} \text{ if } j < j_elim \\ (j+1) \text{ otherwise} \end{array} \right] - C_{i2,j_elim} \cdot \frac{C_{i,j_elim}}{C_{i,j_elim}} \end{array} \right] \\ \left(\frac{C_{i,n+1}}{C_{i,j_elim}} \cdot V(m,n-1,Cp) \right) \text{ if } C_{i,j_elim} \neq 0 \\ 0 \text{ otherwise} \end{array} \right] \right]$

otherwise

EMPTY \leftarrow 0

for $L \in 1..m$

$\left(\text{EMPTY} \leftarrow 1 \right) \text{ if } (C_{L,1} = 0) \cdot (C_{L,2} < 0)$

$\text{pos}_L \leftarrow \left(\begin{array}{l} \frac{C_{L,2}}{C_{L,1}} \text{ if } C_{L,1} > 0 \\ 10^{10} \text{ otherwise} \end{array} \right)$

$\text{neg}_L \leftarrow \left(\begin{array}{l} \frac{C_{L,2}}{C_{L,1}} \text{ if } C_{L,1} < 0 \\ -10^{10} \text{ otherwise} \end{array} \right)$

$\max \left(\left(\begin{array}{l} 0 \\ \min(\text{pos}) - \max(\text{neg}) \end{array} \right) \right) \cdot \text{not}(\text{EMPTY})$

$$Y_{pv} := \frac{V[2 \cdot (m+n), n, A_2]}{\Delta PP}$$

$$Y_{pv} = 93.8\%$$

5.3.2 - Algoritmo para o cálculo da métrica A_i

O algoritmo para o cálculo da métrica A_i é descrito a seguir. Este algoritmo descreve a Equação (4.18) mencionada no capítulo 4, visando estimar o grau de independência funcional de soluções semivinculadas.

Cálculo da Métrica A_i

Inverte elementos da DP

$$A_i := \left| \begin{array}{l} \text{Media} \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0.. \text{Ordem} - 1 \\ \left| \begin{array}{l} \text{Acos} \leftarrow \text{acos} \left[\frac{\left[\left[(A^T)^{\langle i \rangle} \cdot (Id^T)^{\langle i \rangle} \right] \right]}{\left| (A^T)^{\langle i \rangle} \right| \cdot \left| (Id^T)^{\langle i \rangle} \right|} \right] \\ \text{Media} \leftarrow \text{Media} + \text{Acos} \end{array} \right. \\ \frac{\text{Media}}{i + 1} \end{array} \right.$$

5.3.3 - Algoritmo para o cálculo da métrica T_c

Abaixo ilustra-se o algoritmo utilizado para o cálculo da métrica T_c . Trata-se da implementação computacional das Equações (4.12) a (4.17), visando estimar o grau de independência funcional de soluções vinculadas.

Cálculo da Métrica T_c

Inverte elementos da DP

$$DP(\text{pega_ordem}) := \left| \begin{array}{l} \text{linha} \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0.. \text{pega_ordem} \\ \left| \begin{array}{l} V_i \leftarrow \frac{1}{A_{i,i}} \\ \text{linha} \leftarrow \text{linha} + 1 \end{array} \right. \\ V \end{array} \right.$$

Constroi matriz de transformação

$$T := \text{diag}(DP(\text{Ordem} - 1))$$

$$A_ := A \cdot T$$

$$Id := \text{identity}(\text{Ordem})$$

$$G := Id - A_$$

Continuação do algoritmo para o cálculo da métrica T_c .

Autovalores

AutoValor := eigenvals(G)

Real := Re(AutoValor)

TiraSinal(pega_ordem) := $\left\{ \begin{array}{l} \text{linha} \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0.. \text{pega_ordem} \\ \quad \left\{ \begin{array}{l} R_i \leftarrow |\text{Real}_i| \\ \text{linha} \leftarrow \text{linha} + 1 \end{array} \right. \\ R \end{array} \right.$

MaiorModulo := max(TiraSinal(Ordem - 1)) MaiorModulo = 0

$T_c := \left\{ \begin{array}{l} \text{"Utilizar a métrica } A_i" \text{ if } \text{MaiorModulo} = 0 \\ \ln\left(\frac{1}{\text{MaiorModulo}}\right) \text{ otherwise} \end{array} \right.$

5.4 - Considerações finais

Pelo fato de ter sido implementada sob uma base metodológica consistente e bem definida, através desta ferramenta computacional a equipe de projeto poderá concentrar-se diretamente na solução dos problemas que se apresentam, evitando recorrer ao significado e propósitos da metodologia de projeto. Assim, o trabalho a ser realizado pela equipe apresenta-se estruturado na forma de “o que” deseja-se atingir, expresso pelos RFs e “como” pretende-se conseguir o resultado, expresso na forma de PPs. As inter-relações entre “o que” e “como” são descritas pela matriz de projeto.

Desta forma, entende-se que a equipe de projeto terá a oportunidade de elaborar um maior volume de informações de projeto, ampliando as possibilidades de soluções melhoradas e/ou inovadoras para os problemas existentes.

No capítulo que segue, será promovida a aplicação desta ferramenta num estudo de caso.

6 - ESTUDO DE CASO

*“Chegar no meio do caminho
é chegar a lugar nenhum.” (Tom Peters)*

6.1 - Introdução

O presente capítulo apresenta um estudo de caso visando ilustrar a aplicação do processo de seleção de concepções alternativas proposto neste trabalho. Neste estudo será utilizada a ferramenta computacional descrita no capítulo 5. Trata-se, em linhas gerais, do projeto conceitual de parte de um aparelho para cocção domiciliar, comumente denominado de fogão e classificado como um dos eletrodomésticos mais presentes nas residências.

Através dessa aplicação pretende-se demonstrar a funcionalidade da abordagem proposta na seleção de concepções alternativas, durante o projeto conceitual de um dado produto.

6.2 - Problema de projeto

Descrever aqui a importância deste eletrodoméstico seria quase uma redundância. A resposta para tal questionamento pode ser justificada simplesmente pelo nível de popularização hoje obtido por este produto e por nossa necessidade primária: a alimentação.

Basicamente, o processo de preparo de alimentos pode ser dividido em 3 etapas: o pré-preparo, a cocção dos alimentos e a limpeza. O fogão destina-se a auxiliar a segunda etapa do processo: a cocção dos alimentos. Logicamente, para tal processo é necessário calor e, por consequência deste, existe a necessidade de isolamento do produto, para um aumento de eficiência e por aspectos ergonômicos e de segurança.

As maiores temperaturas atingidas no produto ocorrem no forno: cerca de 280°C. Esta magnitude de temperatura certamente causaria graves queimaduras aos usuários, exigindo assim uma isolamento eficiente na porta do forno do produto. Dados normativos indicam que a temperatura no vidro externo da porta não deve exceder em 80°C a temperatura ambiente (NBR-13723-1).

Desta forma, é necessária uma eficiente isolamento na porta deste produto, pois ao mesmo tempo que esta deva permitir um acesso ao forno, deve também isolar a temperatura, transmitindo segurança ao usuário.

Neste trabalho, será realizado um estudo envolvendo a elaboração de conceitos de porta visando solucionar o problema acima descrito e, uma posterior seleção destes através do processo de tomada de decisões proposto.

Como este trabalho foi elaborado com informações e conhecimentos extraídos de uma empresa produtora deste produto, por fins éticos e sigilosos os dados demonstrados neste trabalho foram por vezes alterados ou tiveram sua fonte omitida, visando apenas proteger o conhecimento de propriedade da empresa. Porém, tais alterações não afetam o objetivo deste estudo, que tem por objetivo demonstrar a utilização do processo de tomada de decisões proposto.

6.3 - Definição dos requisitos funcionais

Além dos requisitos funcionais acima listados, a porta de um fogão deve realizar e atender a outros requisitos. Seus requisitos funcionais são:

RF₁: Isolar a temperatura

RF₂: Permitir a visualização

RF₃: Permitir seu travamento

RF₄: Suportar o peso de utensílios

RF₅: Vedar o forno

As restrições associadas a este projeto são:

R1: Custo máximo de 10% do custo total do produto

R2: Dimensões: 50mm(Espessura) x 500mm(Altura) x 600(Largura)mm

O RF₁ define a temperatura exterior da porta. Como a temperatura do forno aproxima-se de 280°C é necessário que a porta possua isolamento. Visando superar as exigências normativas, considera-se aqui que a superfície exterior da porta deva permanecer em torno de 75°C. Quanto menor esta temperatura, melhor. Por isto, este requisito não apresenta sua tolerância inferior estabelecida. Este raciocínio aplica-se também aos demais requisitos, quando não apresentarem tolerâncias especificadas.

O RF₂ estabelece a área de visualização do forno através da porta, sendo desejável um valor de 50% da área deste, segundo pesquisas junto a consumidores. O RF₃ define a vida útil esperada da trava da porta, estimada em função da vida útil do produto e da utilização do forno ao longo desta. O valor desejável é de aproximadamente 5000 ciclos de abertura e fechamento. Ambas as tolerâncias superior e inferior foram estabelecidas objetivando não superestimar nem subestimar sua utilização. O RF₄ estabelece a resistência da porta a um carregamento de aproximadamente 20kg no centro da mesma conforme NBR 13723-1, sendo desejável que deflexão seja no máximo de 5mm, visando também superar as exigências normativas.

Os valores desejados e as tolerâncias associadas a cada requisito funcional são listados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Especificação dos RFs.

	Valor nominal	Tolerância
RF ₁	80°C	+5°C
RF ₂	50%	±5%
RF ₃	5000ciclos	±500ciclos
RF ₄	0,005m	+0,002m
RF ₅	10N	±0,5N

Por último, o RF₅ define a força de atrito de aproximadamente 10N que deverá existir entre a porta e o elemento de vedação, visando evitar o escape de ar quente do forno. Suas tolerâncias superiores e inferiores são igualmente importantes, pois pode ocorrer escape de gases quentes ou a necessidade de uma elevada força para abertura da porta.

6.4 - Definição dos parâmetros de projeto

Visando atender aos requisitos previamente estabelecidos foram elaboradas soluções para o problema.

A primeira solução, denominada Solução A, é ilustrada na forma dos PPs abaixo descritos:

PP₁: Espessura de lâ de vidro

PP₂: Área de visualização

PP₃: Trava

PP₄: Inércia

PP₅: Força de fechamento

Nesta solução o PP₁ satisfará o RF₁ por meio de uma camada de isolamento de lã de vidro no interior da porta. Por meio deste material isolante, pretende-se reduzir o fluxo de calor através da porta. O PP₂ cumprirá o requisito de proporcionar uma boa visualização através da introdução de um vidro na porta do forno. Esta área de visualização é medida como um percentual da área de acesso ao forno. Nesta solução, verifica-se uma inter-relação entre os FR₁ e RF₂, pois quanto maior a área de visualização menor será a área destinada ao isolante, e vice-versa. O PP₃ irá impedir a abertura da porta quando desejado, através de uma trava, a qual deverá atuar perfeitamente ao longo do número de ciclos especificados. O PP₄ controlará a deflexão máxima da porta através de sua inércia, visando atender a deflexão especificada pelo RF₄. Por último, o PP₅ definirá a força de fechamento que a porta deverá possuir para gerar uma força de atrito que evite o escape de ar quente do interior do forno.

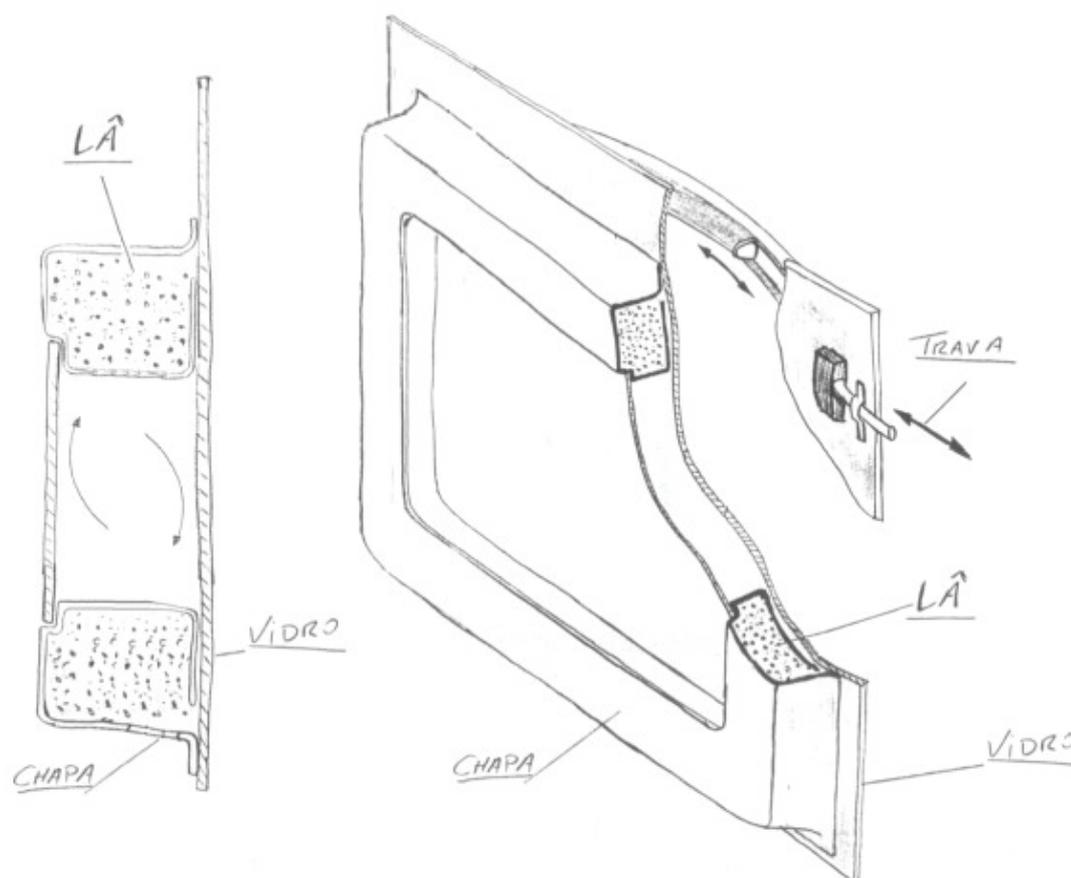


Figura 6.1 – Solução A para o problema proposto.

A Figura 6.1 ilustra a solução encontrada para o conjunto de parâmetros de projeto acima descritos.

Os valores dos PPs que satisfazem os RFs são listados na Tabela 6.2, onde também são especificadas as tolerâncias associadas a cada um destes para esta solução. Ao isolante atribuiu-se uma tolerância de 5mm devido à maleabilidade do material. À área de visualização, devido a variações dimensionais, atribui-se uma variação de 1%. A vida do mecanismo de travamento da porta foi especificada em 5000ciclos, com variação aceitável de 5%. Também devido a variações dimensionais (~1mm) da estrutura da porta a tolerância para a inércia foi estabelecida na ordem de $4 \times 10^{-10} \text{m}^4$ e por último, devido à não uniformidade da força da mola da dobradiça as variações admitidas serão de aproximadamente 10% de seu valor nominal.

Tabela 6.2 – Especificação dos PPs para a Solução A.

	Valor nominal	Tolerância
PP ₁	0,05m	±0,005m
PP ₂	50%	±1%
PP ₃	5000ciclos	±5%
PP ₄	$6,25 \times 10^{-10} \text{m}^4$	$\pm 4 \times 10^{-10} \text{m}^4$
PP ₅	16,67N	±10%

Uma outra solução encontrada para o problema é descrita forma dos PPs abaixo descritos:

PP₁: Área destinada ao ar

PP₂: Área de visualização

PP₃: Trava

PP₄: Inércia

PP₅: Força de fechamento

Nesta solução o PP₁ satisfará o RF₁ por meio de camadas de isolamento de ar no interior da porta. Por meio destas camadas de ar, pretende-se reduzir o fluxo de calor através da porta. O PP₂ cumprirá o requisito de proporcionar uma boa visualização através da introdução de um vidro na porta do forno. Esta área de visualização é medida como um percentual da área de

acesso ao forno. Nesta solução, não verifica-se uma inter-relação entre os RF₁ e RF₂, pois como a isolamento é efetuada com ar esta não reduzirá a área de visualização. O PP₃ irá impedir a abertura da porta quando desejado, através de uma trava. O PP₄ controlará a deflexão máxima da porta através da sua inércia, visando atender a deflexão especificada pelo RF₄.

Por último, o PP₅ definirá a força de fechamento que a porta deverá possuir para gerar uma força de atrito que evite o escape de ar quente do interior do forno.

A Figura 6.2 ilustra a solução encontrada para o conjunto de parâmetros de projeto acima descritos.

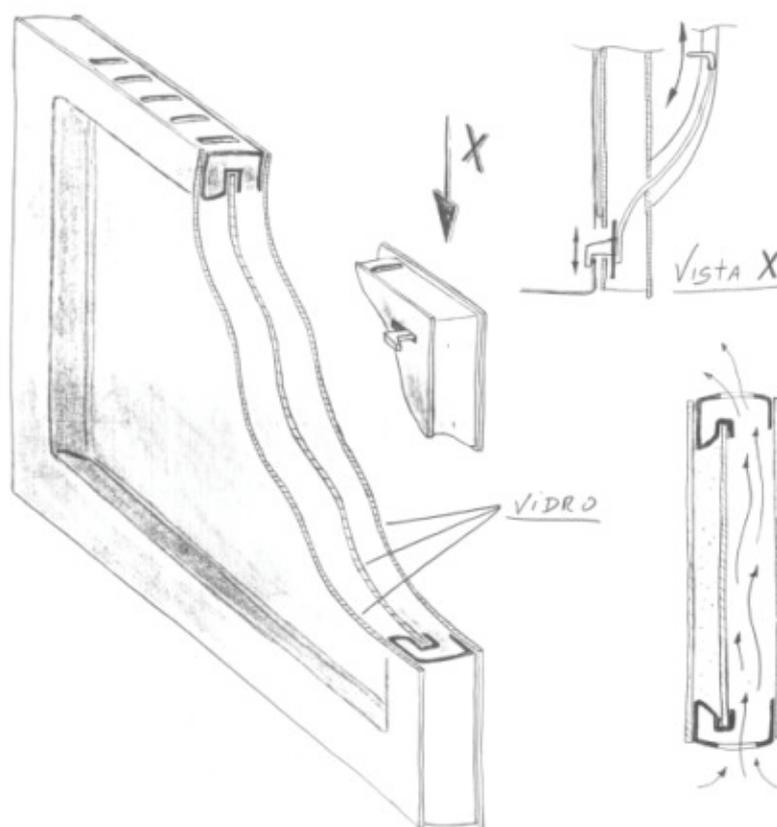


Figura 6.2 – Solução B para o problema proposto.

Os valores dos PPs que satisfazem os RFs são listados na Tabela 6.3, onde também são especificadas as tolerâncias associadas a cada um destes para esta solução. Devido a variações dimensionais atribui-se uma variação de 1% à área onde o ar estará retido e também à área de visualização. A vida do mecanismo de travamento da porta foi especificada em 5000 ciclos, com variação aceitável de 5%. Também devido a variações dimensionais (~1mm) da estrutura da porta a tolerância para a inércia foi estabelecida na ordem de $4 \times 10^{-10} \text{m}^4$ e por último,

devido à não uniformidade da força da mola da dobradiça, as variações admitidas serão de aproximadamente 15% de seu valor nominal, levemente superior à tolerância previamente especificada, devido a maior capacidade da mola.

Tabela 6.3 – Especificação dos PPs para a Solução B.

	Valor nominal	Tolerância
PP ₁	0,3m ²	±0,003m ²
PP ₂	50%	±1%
PP ₃	5000ciclos	±5%
PP ₄	6,25×10 ⁻¹⁰ m ⁴	±4×10 ⁻¹⁰ m ⁴
PP ₅	25N	±15%

6.5 - Preenchimento da matriz de projeto

Visando preencher a matriz de projeto serão descritos os relacionamentos existentes entre os RFs e os PPs. Como as soluções propostas apresentam diferentes PPs, serão elaboradas duas matrizes de projeto.

A matriz de projeto genérica para este problema é definida a seguir:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & A_{15} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} & A_{25} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} & A_{35} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} & A_{45} \\ A_{51} & A_{52} & A_{53} & A_{54} & A_{55} \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

6.5.1 - Descrição dos relacionamentos entre o RF₁ e os PPs

Visando descrever o relacionamento entre o RF₁ e os demais PPs será realizada uma análise térmica da porta. Uma vez que a temperatura interna da mesma é conhecida (280°C) a temperatura externa da mesma pode ser obtida aplicando-se um balanço de energia. Assim, considerando a porta como o volume de controle, tem-se:

$$\dot{E}_{af} = \dot{E}_{ef} \quad (6.2)$$

onde E_{af} é a taxa de afluência de energia num volume de controle e E_{ef} é a taxa de efluência de energia de um volume de controle. Neste caso:

$$\frac{T_f - RF_1}{R_t} = h_\infty A_\infty (RF_1 - T_\infty) \quad (6.3)$$

onde:

T_f é a temperatura da porta na região de contato com o forno

RF_1 é a temperatura da porta na região de contato com o ambiente

R_t é a resistência térmica total

h_∞ é o coeficiente de troca de calor por convecção com o meio externo

A_∞ é a área externa da porta

Neste modelo matemático, considerou-se que o regime de operação é permanente e a condução através da janela seja unidimensional. Também desprezaram-se as trocas de calor por irradiação. Tal modelo pode ser aplicado a ambas as soluções, diferenciando-se apenas a resistência térmica total, R_t (Incropera & Witt, 1992). Nas duas situações o calor é dissipado ao meio ambiente por convecção natural.

Visando atender ao RF_1 , na solução A utiliza-se como resistência térmica o isolante lã de rocha, dimensionado através de sua espessura e área transversal ao fluxo de calor. Porém, devido à necessidade da área de visualização o isolante necessita ser interrompido, como ilustra a Figura 6.3 e, neste espaço mantém-se ar enclausurado.

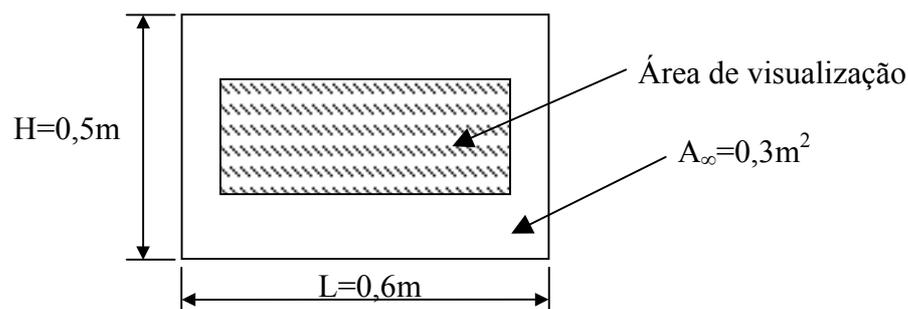


Figura 6.3 – Vista frontal da porta do fogão ilustrando a área visualização.

Assim, a resistência térmica total oferecida pela solução A pode ser obtida através da Equação (6.4). A distribuição das resistências térmicas na porta é ilustrada pela Figura 6.4.

$$R_t = \frac{PP_1}{(k \times A)_{l\tilde{a}} + (h \times A)_{ar_e} \times PP_1} \quad (6.4)$$

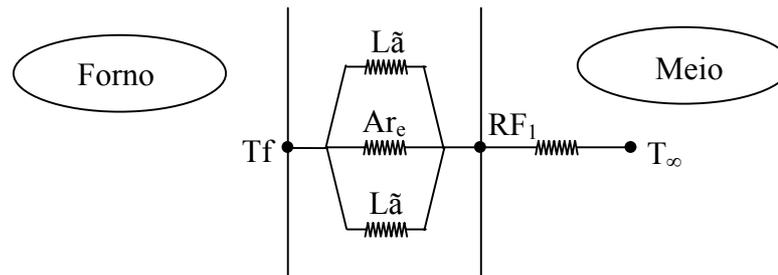


Figura 6.4 – Modelo de resistências térmicas para a solução A.

A área de visualização ou área de ar enclausurado é definida pelo PP_2 , na forma de um percentual da área total da porta (considerou-se a área do forno igual à área da porta). Com base nas restrições dimensionais, a área ocupada pelo ar é dada por $A_{ar_e} = A_{\infty} \times PP_2$. Logo, a área destinada ao isolante será dada por: $A_{l\tilde{a}} = A_{\infty} - A_{\infty} PP_2$.

As constantes de troca de calor por condução e convecção são listadas a seguir: $K_{l\tilde{a}} = 0,07 \text{ W/m}^2\text{°C}$, $h_{ar_e} = 4,04 \text{ W/m}^2\text{°C}$ e $h_{\infty} = 11,61 \text{ W/m}^2\text{°C}^{-1}$. O coeficiente de troca de calor por condução foi obtido com base em informação fornecida por fabricante deste material e os coeficientes de troca de calor por convecção foram obtidos com base no número de *Nusselt* para convecção livre no interior de canais e para placas verticais, respectivamente (Incropera & Witt, 1992). A temperatura do forno é estabelecida como $T_f = 280^{\circ}\text{C}$, com base em dados experimentais fornecidos pelo fabricante do produto.

Assim, a equação que define o comportamento do RF_1 para a solução A é definida pela Equação (6.5), sendo estabelecida com base nas Equações (6.3) e (6.4).

¹ A descrição do cálculo dos coeficientes de troca de calor é ilustrada no Apêndice A deste trabalho.

$$RF_1 = \frac{\frac{k_{l\tilde{a}}(A_\infty - A_\infty PP_2) + h_{ar_e} A_\infty PP_2 \times PP_1}{PP_1} Tf + h_\infty A_\infty T_\infty}{\frac{k_{l\tilde{a}}(A_\infty - A_\infty PP_2) + h_{ar_e} A_\infty PP_2 \times PP_1}{PP_1} + h_\infty A_\infty} \quad (6.5)$$

Analisando a formulação acima, verifica-se que o RF_1 será determinado em função dos PP_1 e PP_2 , pois o PP_1 define a espessura da lã e o PP_2 define a área transversal do isolante. A equação para o RF_1 em função dos elementos da matriz de projeto é dada pela Equação (6.6):

$$RF_1 = A_{11} \times PP_1 + A_{12} \times PP_2 \quad (6.6)$$

onde A_{11} e A_{12} são determinados pelas Equações (6.7) e (6.8)

$$A_{11} = \left. \frac{\partial RF_1}{\partial PP_1} \right|_{PP_2=0,05m} = -281,372 \frac{^\circ C}{m} \quad (6.7)$$

$$A_{12} = \left. \frac{\partial RF_1}{\partial PP_2} \right|_{PP_2=50\%} = 34,414^\circ C \quad (6.8)$$

Visando atender ao RF_1 na solução B, utiliza-se como resistência térmica apenas o ar, dimensionado através da área transversal ao fluxo de calor, existindo duas camadas de ar: ar enclausurado e circulação natural. Neste caso não existe a interação do PP_2 no RF_1 , pois a área de visualização não reduzirá a área do isolante.

Assim, a resistência térmica total oferecida pela solução B pode ser obtida através da Equação (6.9). A distribuição das resistências térmicas na porta é ilustrada pela Figura 6.5.

$$R_t = \frac{1}{PP_1(h_{ar_e} + h_{ar_l})} \quad (6.9)$$

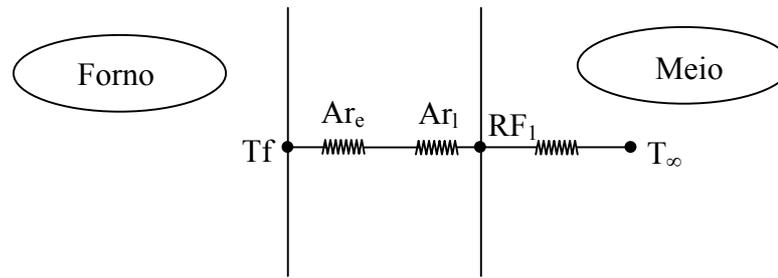


Figura 6.5 – Modelo de resistências térmicas para a solução B.

As constantes de troca de calor por convecção são listadas a seguir: $h_{ar_e} = 4,04\text{W/m}^2\text{C}$, $h_{ar_l} = 8,65\text{W/m}^2\text{C}$ e $h_{\infty} = 11,61\text{W/m}^2\text{C}$ ¹. Os coeficientes de troca de calor por convecção foram obtidos com base no número de *Nusselt* para convecção livre no interior de canais (h_{ar_e}) e para placas verticais (h_{ar_l} e h_{amb}), respectivamente (Incropera & Witt, 1992). A temperatura do forno é estabelecida como $T_f = 280^{\circ}\text{C}$, com base em dados experimentais fornecidos pelo fabricante do produto.

Assim, a equação que define o comportamento do RF_1 para a solução B é definida pela Equação (6.10), sendo estabelecida com base nas Equações (6.3) e (6.9).

$$RF_1 = \frac{PP_1(h_{ar_e} + h_{ar_l})Tf + h_{\infty}A_{\infty}T_{\infty}}{PP_2(h_{ar_e} + h_{ar_l}) + h_{\infty}A_{\infty}} \quad (6.10)$$

Analisando a formulação acima, verifica-se que o RF_1 será determinado em função apenas do PP_1 pois não existe a interação do PP_2 no RF_1 , uma vez que a área de visualização não reduzirá a área do isolante. Logo, PP_2 assumirá um valor constante. A equação para o RF_1 em função dos elementos da matriz de projeto é dada pela Equação (6.11):

$$RF_1 = A_{11} \times PP_1 \quad (6.11)$$

onde A_{11} é determinado pela Equação (6.12)

¹ A descrição do cálculo dos coeficientes de troca de calor é ilustrada no Apêndice A deste trabalho.

$$A_{11} = \left. \frac{\partial RF_1}{\partial PP_1} \right|_{PP_1=0,3m^2} = 141,157 \frac{^\circ C}{m^2} \quad (6.12)$$

6.5.2 - Descrição dos relacionamentos entre o RF₂ e os PPs

O RF₂, “Permitir visualização” é influenciado apenas pelo PP₂ o qual determina a área de visualização da porta.

Em ambas as soluções A e B o relacionamento entre RF e PP é direto, ou seja, o elemento da matriz de projeto A₂₂ será igual à unidade.

6.5.3 - Descrição dos relacionamentos entre o RF₃ e os PPs

O RF₃, “Permitir travamento” também é influenciado apenas pelo PP₃, o qual determina sua eficiência ao longo do tempo.

Como o relacionamento entre o RF₃ e PP₃ será dado pelo elemento A₃₃ da matriz de projeto, este elemento da matriz será igual à unidade em ambos os casos, seja para a solução A seja para a solução B.

6.5.4 - Descrição dos relacionamentos entre o RF₄ e os PPs

O relacionamento entre o RF₄ e os demais PPs pode ser obtido através de uma análise estrutural da porta do produto. Considerando a porta como uma viga engastada sujeita a um carregamento na sua extremidade, a deflexão máxima da porta pode ser calculada pela Equação (6.13), onde:

$$RF_4 = \frac{FL^3}{3EI} \quad (6.13)$$

F: Força aplicada a viga engastada

L: Comprimento da viga

E: Modulo de elasticidade

I: Inércia da seção transversal

A deflexão da porta deve-se à deformação elástica de sua estrutura e da

deformação elástica da dobradiça, conforme ilustra a Figura 6.6.

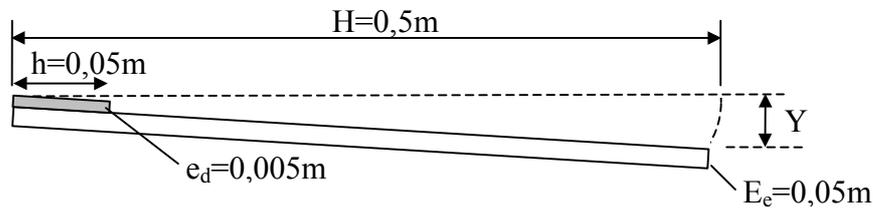


Figura 6.6 – Vista lateral da porta ilustrando sua deflexão.

Sua deflexão total pode ser determinada calculando-se a deflexão na extremidade da porta devido à deformação elástica da dobradiça e adicionando a deformação elástica da estrutura da porta, conforme ilustra a Equação (6.14). Os índices “d” e “e” referem-se à dobradiça e à estrutura da porta, respectivamente. O fator “H/h” multiplicado na primeira parcela da equação calcula a deformação da extremidade da porta quando a fechadura deforma-se.

$$RF_4 = \frac{H}{h} \frac{F_d h^3}{3EI_d} + \frac{F_e H^3}{3EI_e} \quad (6.14)$$

Como a formulação acima é válida para vigas engastadas com carregamento em sua extremidade, deve-se calcular as cargas equivalentes corrigindo-se as distâncias, ou seja, a carga de 196N aplicada no centro da porta equivaleria a uma carga de 700N aplicada à dobradiça e a uma carga de 98N aplicada à extremidade da porta. Logo, $F_d = 700N$ e $F_e = 98N$.

Porém, a formulação acima é válida para seções constantes e, como na estrutura da porta existe uma descontinuidade devido à área de visualização, deve-se aplicar um fator de correção, denominado fator de concentração de tensões. Este fator pode ser aproximadamente calculado com base na área de visualização definida pelo PP_2 , sendo determinado pela Equação (6.15) adaptada de Shigley (1984). Tal fator deve ser dividido pela inércia da seção ou multiplicado a tensão admissível do material à flexão.

$$Kt = 1,9 - 1,2 \frac{\sqrt{H \times L \times PP_2}}{L} \quad (6.15)^1$$

¹ Para o cálculo do fator de concentração de tensões utilizaram-se dados referentes a seções interrompidas por furos e, considerou-se a área de visualização no formato de um quadrado.

Assim, substituindo (6.15) em (6.14) obtém-se a Equação (6.16) a qual descreve que o RF_4 é influenciado pelos PP_2 e PP_4 , definindo a inércia da dobradiça. A inércia da estrutura é determinada com base nas restrições estabelecidas durante a definição dos requisitos.

$$RF_4 = \frac{H}{h} \frac{F_d h^3}{3E \times PP_4} + \frac{F_e H^3}{3E \times I_e} \left(1,9 - 1,2 \sqrt{\frac{H \times L \times PP_2}{L}} \right) \quad (6.16)$$

A equação para o RF_4 em função dos elementos da matriz de projeto será dada pela Equação (6.17) e os elementos da matriz de projeto serão determinados pelas equações (6.18) e (6.19).

$$RF_4 = A_{42} \times PP_2 + A_{44} \times PP_4 \quad (6.17)$$

$$A_{42} = \left. \frac{\partial RF_4}{\partial PP_2} \right|_{PP_2=50\%} = -2.091 \times 10^{-5} m \quad (6.18)$$

$$A_{44} = \left. \frac{\partial RF_4}{\partial PP_4} \right|_{PP_4=6,25 \times 10^{-10} m^4} = -7.964 \times 10^6 \frac{1}{m^3} \quad (6.19)$$

Porém, é necessário que a deformação gerada esteja dentro do limite elástico dos materiais, pois do contrário ocorreriam deformações permanentes. Deve-se então verificar tensões geradas devido à flexão, na dobradiça e na estrutura da porta conforme as Equações (6.20) e (6.21).

$$\sigma_d = \frac{F_f \times h \times e_d}{2PP_4} \quad (6.20)$$

$$\sigma_e = \frac{F_f \times h \times E_e}{2I_e} \quad (6.21)$$

Realizando as verificações, constata-se que $\sigma_d \cong 200MPa$ e $\sigma_e \cong 2MPa$, sendo portanto aceitáveis, pois as tensões limites de escoamento de aços são da ordem de 150MPa a 350MPa.

6.5.5 - Descrição dos relacionamentos entre o RF_5 e os PP_5 s

O RF_5 define a força de atrito que deverá existir entre a porta e o elemento de vedação do forno visando evitar o escape de gases quentes. A força de atrito pode então ser calculada pela Equação (6.22) onde:

$$RF_5 = \mu \times PP_5 \quad (6.22)$$

μ : Coeficiente de atrito entre os materiais em contato

PP_5 : Força de fechamento da porta

Como o relacionamento entre o RF_5 e PP_5 será dado pelo elemento A_{55} da matriz de projeto, este elemento da matriz será igual ao coeficiente de atrito entre os materiais em contato. Na solução A, A_{55} será o coeficiente de atrito entre os materiais borracha e metal e, na solução B A_{55} será o coeficiente de atrito entre os materiais borracha e vidro. Segundo dados encontrados na literatura, aproximadamente os coeficientes serão: 0,6 e 0,4, respectivamente

6.5.6 - Matriz de projeto para as soluções A e B

Agrupando todos os valores calculados previamente, obtém-se as matrizes de projeto para a solução A e para a solução B conforme ilustra as Equações (6.23a) e (6.23b), respectivamente.

$$\begin{bmatrix} -281,372 & 34.414 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -2.091 \times 10^{-5} & 0 & -7.964 \times 10^6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,6 \end{bmatrix} \quad (6.23a)$$

$$\begin{bmatrix} 136.884 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -2.091 \times 10^{-5} & 0 & -7.964 \times 10^6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,4 \end{bmatrix} \quad (6.23b)$$

Estas matrizes, juntamente com os RFs e os PPs das soluções A e B, serão utilizadas no cálculo das métricas para seleção da melhor alternativa.

6.6 - Cálculo das métricas e seleção das soluções

Para calcular as métricas necessárias para a avaliação das soluções propostas será utilizada a ferramenta computacional mencionada no capítulo 5. Informando ao programa os dados sobre os RFs, PPs e os elementos da matriz de projeto previamente definidos, obteve-se os valores ilustrados na Figura 6.7 e Figura 6.8 para a solução A e B, respectivamente.

Sobre estes dados, é importante salientar o modo como as tolerâncias dos RFs foram inseridas no programa. Na definição dos RFs realizada no item 6.3, pode-se verificar que alguns requisitos somente apresentam sua tolerância inferior ou superior estabelecida. Isto ocorre quando apenas a variação superior ou inferior necessita ser controlada. Porém, como o programa não aceita valores em “branco”, as tolerâncias foram definidas em seus limites físicos extremos. Por exemplo: para o RF₁ a temperatura deseja é de 80°C e a temperatura ambiente é de 25°C. Assim, a temperatura mínima na porta poderá variar entre 80°C e 25°C e, portanto, a tolerância inferior estabelecida como 55°C. O raciocínio é análogo para o RF₄, que controla a deflexão da porta. Considerando como nula a mínima deflexão que porta pode apresentar, sua variação inferior estará entre o valor meta de 5mm e 0mm. Desta forma, a tolerância inferior para este requisito foi estabelecida em 5mm.

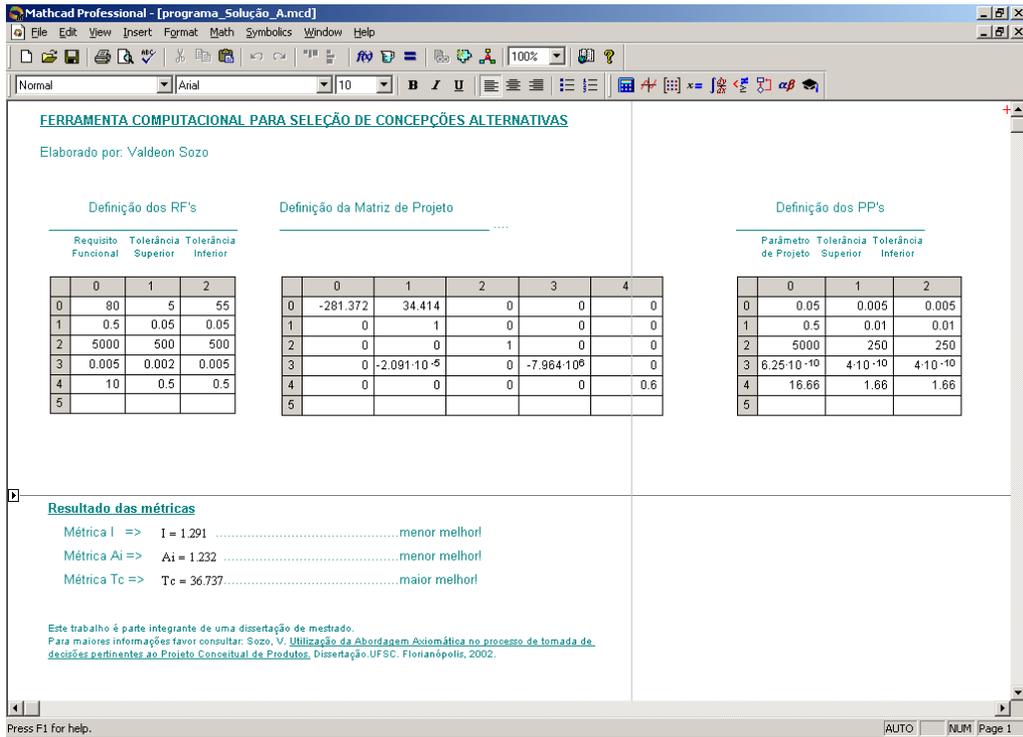


Figura 6.7 – Resultado das métricas para a solução A.

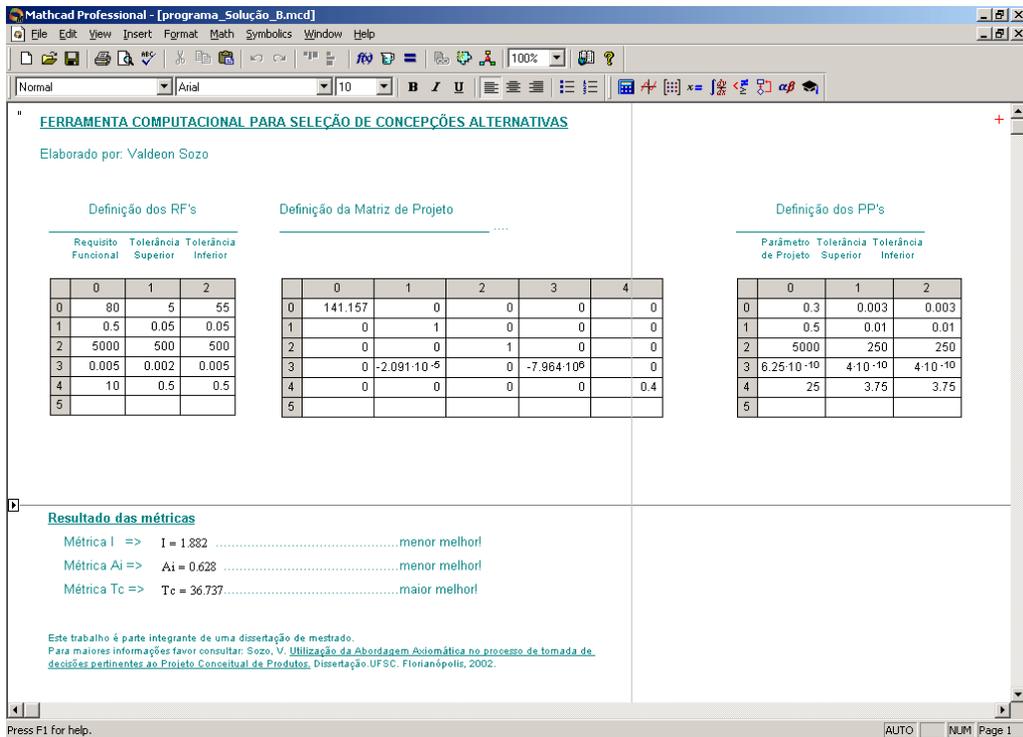


Figura 6.8 – Resultado das métricas para a solução B.

Analisando as matrizes de projeto das soluções A e B, verifica-se que a solução A caracteriza-se como solução do tipo vinculada e a solução B como semivinculada. Desta forma

utiliza-se a métrica I e a métrica Ai para avaliá-las. A métrica Tc , conforme mencionado no capítulo 4, aplica-se apenas quando compara-se soluções vinculadas e a métrica I não apresenta restrições de aplicação.

Os valores obtidos estão listados na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Resultado das métricas obtidas com a ferramenta computacional.

	Solução A	Solução B
I	1,291	1,882
Ai	1,232	0,628

Para ambas as métricas é desejável um menor valor, ou seja, quanto menor forem os valores de I e Ai , melhor será a solução. Porém, quando toma-se como critério a métrica I a solução A seria escolhida e, quando toma-se como critério a métrica Ai a solução B seria escolhida.

Como ambas as alternativas apresentam certa dependência funcional, neste caso é preferível aquela que apresentar um maior grau de independência funcional mesmo que apresente um maior conteúdo de informações, conforme orientações estabelecidas no capítulo 4.

Portanto, a solução B deve ser selecionada. Uma das características que propiciaram grande vantagem à esta solução deve-se à relação de dependência existente entre os RF_1 e RF_2 na solução A, ou seja, um aumento na isolação visando atender ao RF_1 reduz a satisfação ao RF_2 , área de visualização.

6.7 - Considerações finais

No presente capítulo apresentou-se um estudo de caso cujo propósito foi o de avaliar as potencialidades e as limitações do processo de seleção de concepções alternativas e da ferramenta computacional elaborada.

Diante do problema identificado, conduziu-se o projeto conceitual de duas soluções através do estabelecimento dos RFs e das soluções através dos PPs. Duas soluções foram geradas e avaliadas segundo o processo de seleção proposto.

Pode-se verificar que não houve a necessidade de estabelecer critérios para a seleção das alternativas. Os critérios utilizados foram apenas o critério de independência

funcional e conteúdo de informações, e através das métricas introduzidas verificou-se o atendimento a cada um deles, apresentando assim de forma concisa a solução mais adequada.

Para selecionar as soluções através dos métodos propostos anteriormente na literatura seria necessário estabelecer critérios de avaliação, priorizá-los através de pesos e definir a pontuação de cada solução para cada critério. Porém, o nível de subjetividade envolvido seria maior e poder-se-ia obter como resultado uma solução diferente da escolhida, devido à subjetividade previamente mencionada ou mesmo a ausência de algum critério importante.

Visando ilustrar tal afirmação, decidiu-se realizar o processo de seleção destas concepções utilizando um dos métodos anteriormente propostos. Neste caso, foram utilizados como critérios de seleção os requisitos funcionais do projeto, conforme ilustra a Tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Seleção das concepções através do método de Pugh.

	Requisitos	Peso	Solução A	Solução B
Projetista 1	Isolar a temperatura	5	3	4
	Permitir a visualização	5	4	3
	Permitir seu travamento	3	3	4
	Suportar o peso de utensílios	2	2	2
	Vedar o forno	5	4	3
	-	Total	<u>68</u>	66
	Projetista 2	Requisitos	Peso	Solução A
Isolar a temperatura		5	3	4
Permitir a visualização		3	2	4
Permitir seu travamento		1	3	3
Suportar o peso de utensílios		4	3	2
Vedar o forno		4	3	3
-		Total	48	<u>55</u>
Projetista 3	Requisitos	Peso	Solução A	Solução B
	Isolar a temperatura	5	3	4
	Permitir a visualização	4	4	3
	Permitir seu travamento	3	4	3
	Suportar o peso de utensílios	2	3	3
	Vedar o forno	5	4	4
	-	Total	<u>69</u>	67

Solicitou-se então a três participantes do projeto que realizassem o processo de

seleção. A cada requisito (ou critério de seleção neste caso) foram atribuídos pesos de "1" a "5", sendo "1" o valor que descreve um requisito com menor importância e "5" o valor que descreve um requisito de grande importância para o projeto. A mesma escala foi aplicada as notas dadas para cada solução, onde "1" significa que a solução em questão pouco atende o requisito em análise e "5" expressa que a solução em questão atende fortemente o requisito sendo analisado.

Conforme ilustra a Tabela 6.5 diferentes avaliações foram obtidas. Ao Projetista 1 e Projetista 3 a solução A apresentou-se como melhor alternativa. Já ao Projetista 2 a solução B apresentou-se como melhor alternativa. Ou seja, temos contradições na avaliação devido ao elevado nível de subjetividade associado com este processo de avaliação. Porém, cabe salientar que o tempo para realização desta avaliação foi menor que o tempo dedicado quando utilizada a metodologia proposta neste trabalho. Trata-se desta forma de um balanço entre o risco que se deseja correr e o tempo necessário para realizar tal avaliação.

Ainda com relação ao processo de seleção proposto verificou-se que a métrica Tc , não utilizada na seleção pois não aplica-se às soluções semivinculadas, mostrou-se insensível às diferenças de independência quando alteravam-se alguns parâmetros de projeto. Isto deve-se à grande diferença de magnitude entre os valores da matriz de projeto, pois como originalmente proposta pelos autores, esta métrica foi utilizada preenchendo-se a matriz de projeto por meio de avaliações subjetivas, e nesta, os elementos não possuem grandes diferenças em sua magnitude. Quando isto ocorrer, sugere-se então a utilização da métrica Ai , pois a mesma pode ser aplicada tanto para soluções semivinculadas quanto para soluções vinculadas.

A ferramenta computacional também apresentou-se adequada para auxiliar na condução efetiva do processo de seleção. Como aspecto negativo, salienta-se o tempo de execução, de aproximadamente 5 minutos utilizando-se um processador de 1,3GHz. Porém, o tempo necessário para calcular manualmente as métricas certamente seria muito maior, e as chances de erro aumentariam.

7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

*“Mestre não é quem sempre ensina,
mas quem de repente aprende.”*

(João Guimarães Rosa)

7.1 - Introdução

Em parte, alguns pareceres conclusivos sobre os assuntos e resultados apresentados neste trabalho foram estabelecidos durante os estudos que se realizaram nos capítulos apresentados.

Cabe aqui, além de uma síntese dos trabalhos realizados, estabelecer as conclusões gerais deste trabalho, em função dos objetivos traçados e, estabelecer caminhos a serem perseguidos, em futuros trabalhos, sob o tema desenvolvido, visando à evolução do processo de seleção e da ferramenta computacional propostos. Assim, são apresentadas, nos itens que se seguem, as principais conclusões e recomendações do presente trabalho.

7.2 - Conclusões

Este trabalho se apresenta na forma de um desenvolvimento e implementação computacional de um processo de tomada de decisões envolvendo a abordagem axiomática de projetos, aplicado à seleção de concepções alternativas durante a fase de projeto conceitual de produtos.

Através de uma análise crítica do processo de tomada de decisões envolvendo a seleção de concepções alternativas, pôde-se observar que os diferentes métodos existentes na literatura primam pela clareza e simplicidade do projeto e, na maioria dos casos apresentavam como critério as especificações de projeto que, logicamente irão diferenciar-se de projeto para projeto. Concluiu-se então que existem critérios e orientações a serem seguidos no processo de tomada de decisões. Porém estes são muitas vezes dependentes do domínio em questão

inexistindo um conjunto de especificações de projeto que possa ser usado de modo geral para todas as áreas de projeto.

Tendo então por objetivo sanar esta deficiência e reduzir o nível de subjetividade das avaliações foram realizadas pesquisas envolvendo a abordagem axiomática de projetos. Através de uma revisão da literatura pôde-se identificar inúmeras contribuições desta abordagem no processo de projeto. Tal abordagem prevê a utilização de axiomas como critérios para tomada de decisões. Vários autores têm utilizado e pesquisado a abordagem axiomática, ilustrando exemplos e sua integração com outras teorias, resultando em benefícios ao processo de desenvolvimento de produtos. Porém, existem também autores que contestam a aplicação da abordagem axiomática a todas as áreas de projetos, citando que os axiomas de projeto deveriam ser tratados como dois princípios de projeto, entre muitos outros, aplicáveis a muitos casos. De qualquer forma, vários exemplos demonstrando a potencialidade desta abordagem foram ilustrados e não foram encontrados na literatura exemplos constituindo-se em exceções de modo a invalidar os axiomas.

Porém, a forma como estes axiomas se apresentavam, seja por definição ou por carência de métricas para mensurá-los, dificultava a sua aplicação em determinadas situações de projeto, sendo talvez esta a principal razão da não unanimidade entre alguns pesquisadores.

Tais axiomas foram então redefinidos na forma de critérios ou metas a serem otimizadas e pela introdução de novas métricas conseguiu-se expressar adequadamente o seu maior ou menor atendimento, possibilitando uma maior abrangência de aplicação à abordagem axiomática.

Em suma, foram introduzidos critérios adequados para seleção entre alternativas vinculadas e semivinculadas, no que se refere ao primeiro axioma e, a possibilidade de avaliar soluções vinculadas e semivinculadas com relação ao segundo axioma, tarefa esta até então não realizada pela ausência de métricas apropriadas. Tais métricas existiam previamente na literatura, mas de forma isolada. Neste trabalho, foram agrupadas na forma de um conjunto de atividades visando suportar as decisões a serem tomadas no processo de seleção de concepções alternativas, sendo assim, uma das contribuições deste trabalho.

Foram sugeridas também orientações para o preenchimento da matriz de projeto, a qual descreve as interações entre RFs e PPs e serve de base para a determinação do atendimento ao critério de independência funcional. Na literatura, as orientações para tal tarefa também eram escassas.

Este processo de tomada de decisões proposto foi submetido a um estudo de caso, cujo propósito era avaliar as potencialidades e limitações do processo de seleção e da ferramenta computacional elaborada. Constatou-se que utilizando apenas o critério de independência funcional e conteúdo de informações pôde-se selecionar de forma concisa uma solução mais adequada, e que, apesar do tempo de execução da ferramenta computacional ter-se apresentado um pouco elevado, o tempo necessário para calcular manualmente as métricas certamente seria muito maior, e as chances de erro aumentariam.

Em suma, as principais vantagens do processo de tomada de decisões proposto neste trabalho residem na redução do nível de subjetividade existente na seleção de soluções alternativas, através da utilização de axiomas como critérios para tomadas de decisões e através do mapeamento das relações entre RFs e PPs, pois não é necessário estabelecer critérios, priorizá-los através de pesos e selecionar as soluções através de notas, atividades estas com elevado nível de subjetividade.

Portanto, propôs-se neste trabalho um processo de seleção de concepções alternativas envolvendo as novas métricas estabelecidas que, implementado em uma ferramenta computacional possibilita melhores resultados para problemas que se apresentem durante a fase de projeto conceitual de produtos.

7.3 - Recomendações

Conforme mencionado anteriormente, procurou-se pôr em prática as atividades de seleção de concepções alternativas sob o auxílio de uma ferramenta computacional.

Derivado destas contribuições verificou-se que, sob o processo proposto e suas principais características, há potencial para futuras pesquisas e implementações, manifestadas pelo próprio fabricante do produto sob o qual realizou-se o estudo de caso.

Dentre elas, identificou-se a possibilidade de utilizar um algoritmo para o cálculo do conteúdo de informações considerando distribuição normal de probabilidade, visando calcular os índices de capacidade do processo C_p e C_{pk} . Tal aprimoramento irá requerer também maiores informações, como por exemplo, o desvio padrão da solução aplicada. Estes índices permitirão identificar o grau de atendimento às especificações informando por exemplo o grau de rejeição obtido em partes por milhão (ppm).

Sugere-se também a realização de estudos envolvendo a abordagem axiomática e os conceitos de projeto robusto, pois os axiomas refletem o atendimento às especificações e o

grau de influência das soluções sobre estas, permitindo avaliações para que o produto mantenha sua performance independentemente das condições ou ruídos que venham a ocorrer.

Quanto à ferramenta computacional agora disponível no NeDIP/UFSC, sugere-se sua utilização nos próximos trabalhos realizadas em disciplinas ou projetos de dissertação e tese, visando a divulgação da abordagem axiomática e ao aprimoramento da ferramenta computacional.

APÊNDICE A

“Jamais corte o que precisa ser desatado.”

(anônimo)

A.1 - Introdução

Neste apêndice são descritas as fórmulas e procedimentos utilizados para o cálculo dos elementos da matriz de projeto. Tais formulações foram resolvidas através do software MathCad, versão 2000 Professional.

A.2 - Descrição da obtenção dos elementos da matriz de projeto A_{11} e A_{12}

A seguir, ilustra-se o procedimento utilizado no cálculo dos elementos da matriz de projeto referente ao RF_1 para as soluções A e B.

Cálculo dos elementos para o RF_1

Requisitos

$$\begin{aligned} PP1 &:= 50 \cdot 10^{-3} \text{ m} \\ PP2 &:= 50\% \quad \text{Ver outro valor} \\ &\quad \text{ao lado} \end{aligned}$$

Dados

$$\begin{aligned} T_f &:= 280 \text{ }^\circ\text{C} & H &:= 500 \cdot 10^{-3} \text{ m} & L &:= 600 \cdot 10^{-3} \text{ m} \\ T_{oo} &:= 25 \text{ }^\circ\text{C} & A_{oo} &:= H \cdot L & A_{oo} &= 0.3 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Coefficientes de troca de calor por condução do isolante lã de rocha

$$K_{la} := 0.07 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

Coefficientes de troca de calor por convecção do ar enclausurado

$$g := 9.81 \quad T_i := 150 \quad T_m := \frac{(T_f + T_i)}{2} + 273.15 \quad \beta := \frac{1}{T_m}$$

$$k := 40.7 \cdot 10^{-3} \quad \nu := 38.79 \cdot 10^{-6} \quad \alpha := 56.7 \cdot 10^{-6} \quad Pr := 0.684$$

$$Ra_{ar_e} := \frac{g \cdot \beta \cdot (T_f - T_i) \cdot L^3}{\alpha \cdot \nu} \quad Nu_{ar_e} := 0.18 \cdot \left(\frac{Pr}{0.2 + Pr} \cdot Ra_{ar_e} \right)^{0.29} \quad Nu_{ar_e} = 45.882$$

$$har_e := \frac{Nu_{ar_e}}{L} \cdot k \quad \boxed{har_e = 3.112} \frac{\text{W}}{\text{m}^2^\circ\text{C}}$$

Coeficientes de troca de calor por convecção livre no interior da porta

Propriedades: idem ao anterior

$$Ra_{ar_1} := \frac{g \cdot \beta \cdot (T_f - T_i) \cdot H^3}{\alpha \cdot \nu} \quad Nu_{ar_1} := \left[0.825 + \frac{0.387 \cdot Ra_{ar_1}^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right]^2 \quad Nu_{ar_1} = 68.384$$

$$har_1 := \frac{Nu_{ar_1}}{H} \cdot k \quad \boxed{har_1 = 5.566} \quad \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

Coeficientes de troca de calor por convecção livre com ambiente

$$g := 9.81 \quad T_i := 25 \quad T_m := \frac{(T_f + T_i)}{2} + 273.15 \quad \beta := \frac{1}{T_m}$$

$$k := 33.8 \cdot 10^{-3} \quad \nu := 26.41 \cdot 10^{-6} \quad \alpha := 38.3 \cdot 10^{-6} \quad Pr := 0.69$$

$$Ra_{oo} := \frac{g \cdot \beta \cdot (T_f - T_i) \cdot H^3}{\alpha \cdot \nu}$$

$$Nu_{oo} := \left[0.825 + \frac{0.387 \cdot Ra_{oo}^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right]^2 \quad Nu_{oo} = 110.895$$

$$hoo := \frac{Nu_{oo}}{H} \cdot k \quad \boxed{hoo = 7.497} \quad \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

Solução A

$$RF1a := \frac{\left[\frac{Kla \cdot (Aoo - Aoo \cdot PP2) + har_e \cdot Aoo \cdot PP2 \cdot PP1}{PP1} \right] \cdot T_f + hoo \cdot Aoo \cdot Too}{\left[\frac{Kla \cdot (Aoo - Aoo \cdot PP2) + har_e \cdot Aoo \cdot PP2 \cdot PP1}{PP1} \right] + hoo \cdot Aoo} \quad RF1a = 83.991 \quad ^\circ C$$

$$A11a := \frac{d}{dPP1} \left[\frac{\left[\frac{Kla \cdot (Aoo - Aoo \cdot PP2) + har_e \cdot Aoo \cdot PP2 \cdot PP1}{PP1} \right] \cdot T_f + hoo \cdot Aoo \cdot Too}{\left[\frac{Kla \cdot (Aoo - Aoo \cdot PP2) + har_e \cdot Aoo \cdot PP2 \cdot PP1}{PP1} \right] + hoo \cdot Aoo} \right] \quad A11a = -281.372 \quad \frac{^\circ C}{m}$$

$$A12a := \frac{d}{dPP2} \left[\frac{\left[\frac{Kla \cdot (Aoo - Aoo \cdot PP2) + har_e \cdot Aoo \cdot PP2 \cdot PP1}{PP1} \right] \cdot T_f + hoo \cdot Aoo \cdot Too}{\left[\frac{Kla \cdot (Aoo - Aoo \cdot PP2) + har_e \cdot Aoo \cdot PP2 \cdot PP1}{PP1} \right] + hoo \cdot Aoo} \right] \quad A12a = 34.414 \quad ^\circ C$$

Solução B

$$PP1 := H \cdot L \quad PP1 = 0.3$$

$$RF1b := \frac{\left(\frac{har_e \cdot har_l}{har_e + har_l} \cdot PP1 \right) \cdot Tf + hoo \cdot Aoo \cdot Too}{\left(\frac{har_e \cdot har_l}{har_e + har_l} \cdot PP1 \right) + hoo \cdot Aoo} \quad RF1b = 78.623 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$A11b := \frac{d}{dPP1} \left[\frac{\left(\frac{har_e \cdot har_l}{har_e + har_l} \cdot PP1 \right) \cdot Tf + hoo \cdot Aoo \cdot Too}{\left(\frac{har_e \cdot har_l}{har_e + har_l} \cdot PP1 \right) + hoo \cdot Aoo} \right] \quad A11b = 141.157 \frac{^\circ\text{C}}{\text{m}^2}$$

$$A12b := \frac{d}{dPP2} \left[\frac{\left(\frac{har_e \cdot har_l}{har_e + har_l} \cdot PP1 \right) \cdot Tf + hoo \cdot Aoo \cdot Too}{\left(\frac{har_e \cdot har_l}{har_e + har_l} \cdot PP1 \right) + hoo \cdot Aoo} \right] \quad A12b = 0$$

A.3 - Descrição da obtenção dos elementos da matriz de projeto A_{42} e A_{44}

A seguir, ilustra-se o procedimento utilizado no cálculo dos elementos da matriz de projeto referente ao RF_4 sem diferenciação, neste caso, para as soluções A e B.

Cálculo dos elementos para o RF_4

Requisitos

$$PP2 := 50\% \quad F := 20 \cdot 9.8 \text{ N}$$

Estrutura

$$H := 500 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$L := 600 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$Ee := 50 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$Emat := 1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$Ie := \frac{LEe^3}{12} - \frac{L(Ee - 2 \cdot Emat)^3}{12} \quad Ie = 7.204 \times 10^{-7}$$

Constantes

$$E := 210 \cdot 10^9 \text{ MPa}$$

Dobradiça

$$h := 80 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$l := 2 \cdot 30 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad \text{Duas dobradiças}$$

$$ed := 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$PP4 := \frac{l ed^3}{12} \quad PP4 = 6.25 \times 10^{-10} \quad \boxed{\text{Inércia}}$$

Cálculo da forças equivalentes

$$M := F \cdot \frac{H}{2} \quad Fe := \frac{M}{H} \quad Fd := \frac{M}{h}$$

Cálculo do fator de concentração de tensões

$$K_t := 1.9 - 1.2 \cdot \frac{\sqrt{H \cdot L \cdot PP2}}{L} \quad K_t = 1.125$$

Cálculo da deflexão

$$RF4 := \frac{H}{h} \cdot \frac{Fd \cdot h^3}{3 \cdot E \cdot PP4} + \frac{Fe \cdot H^3}{3 \cdot E \cdot Ie} \cdot \left(1.9 - 1.2 \cdot \frac{\sqrt{H \cdot L \cdot PP2}}{L} \right) \quad RF4 = 5.008 \times 10^{-3}$$

$$A42 := \frac{d}{dPP2} \left[\frac{H}{h} \cdot \frac{Fd \cdot h^3}{3 \cdot E \cdot PP4} + \frac{Fe \cdot H^3}{3 \cdot E \cdot Ie} \cdot \left(1.9 - 1.2 \cdot \frac{\sqrt{H \cdot L \cdot PP2}}{L} \right) \right] \quad A42 = -2.091 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$A44 := \frac{d}{dPP4} \left[\frac{H}{h} \cdot \frac{Fd \cdot h^3}{3 \cdot E \cdot PP4} + \frac{Fe \cdot H^3}{3 \cdot E \cdot Ie} \cdot \left(1.9 - 1.2 \cdot \frac{\sqrt{H \cdot L \cdot PP2}}{L} \right) \right] \quad A44 = -7.964 \times 10^6 \frac{1}{m^3}$$

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALTSHULLER, G. **Creativity as an Exact Science** New York: Gordon and Breach, 1988.
- ARCIDIACONO, G.; et al. **A measure for design coupling**. In: ICED 2001. Glasgow. Proceedings. Cd1.
- BACK, N. **Metodologia de projeto de produtos industriais**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1983.
- BACK, N.; FORCELLINI, F. A. **Projeto de produtos**. CTC/EMC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 1997. Apostila (EMC 6605)
- BLANCHARD, B. S.; FABRICKY, W. J. **System Engineering and Analysis**. 2. ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1990.
- CSILLAG, J. M. **Análise de Valor; Metodologia do Valor**. São Paulo: Atlas, 1985.
- DIMAROGONAS, A. D. **On the axiomatic foundation of design**. In: Design Theory and Methodology – ASME, 1993. New York. Proceedings. p. 253-258.
- ERKENS, A. **Beiträge zur Konstruktionserziehung**. Z. VDI 72 (1928) 17-21.
- EVBUOMWAN, N. F. O; et al. **A survey of design philosophies, models, methods and systems**. Proceeding: Institution of Mechanical Engineerings. Vol 210, 1996. p. 301-319.
- FERREIRA, M. G. G. **Utilização de modelos para a representação de produtos no projeto conceitual**. PPGEM. UFSC. Florianópolis. 1997. Dissertação.

- FINGER, S.; DIXON, J. R. **A Review of Research in Mechanical Engineering Design, Part I: Descriptive, Prescriptive, and Computer-Based Models of Design Process**". Research in Engineering Design, Vol. 1, Springer International, 1989a, p. 51-67.
- FINGER, S.; DIXON, J. R. **A Review of Research in Mechanical Engineering Design, Part II: Representations, Analysis, and Design for the Life Cycle**". Research in Engineering Design, Vol. 1, Springer International, 1989b, p. 121-137.
- FINKELSTEIN, L.; FINKELSTEIN, A. C. W. **Review of design methodology**. Proceedings: IEE-Science, Measurement and Technology, vol. 130. Pt. A, N. 4, June 1983. P. 213-221.
- FONSECA, A. J. H. **Sistematização do processo de elaboração das especificações de projetos de produtos industriais e sua implementação computacional**. - PPGEM. UFSC. Florianópolis. 2000. Tese.
- FREY, D. D., et al. **Computing the Information Content of Decoupled Designs**. Research in Engineering Design, Vol. 12 No. 2, 2000, pp. 90-102.
- INCROPERA, F. P.; WITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 3 ed. Rio de Janeiro: John Wiley & Sons, 1992.
- MARSTON, M.; MISTREE, F. **The Applicability of the Axiomatic and Decision-Based Design Equations in Variant Design**. Proceedings of ASME Design Engineering Technical Conferences, September 14-17, 1997. Sacramento, California
- HARUTUNIAN, V.; et al. **Decision Making and Software Tools for Product Development Based on Axiomatic Design Theory**. The 1996 CIRP General Assembly in Como, Italy. August, 25-31, 1996. Vol 45/1.
- HUBKA, V. **WDK 3: Fachbegriffe der wissenschaftlichen konstruktionslehre in 6 Sprachen**. Zürich: Heurista, 1980.

- HUBKA, V.; EDER, E. W. **Design science: Introduction to needs, scope and organization of engineering design knowledge**. 2. ed. Great Britain: Springer-Verlag London Limited, 1996.
- HUTCHINSON FAMILY ENCYCLOPEDIA. **Steam engine**. Helicon Publishing 2000.
Disponível em: < <http://ebooks.whsmithonline.co.uk/encyclopedia/34/M0026134.htm>>.
Acesso em 07 de fevereiro de 2001.
- KIM, Y. S.; COCHRAN. **Reviewing TRIZ from the perspective of Axiomatic Design**. In: Journal of Engineering Design, 2000. Vol 11. Proceedings. p. 79-94.
- LASSERRE, J. B. **An analytical Expression and an Algorithm for the Volume of a Convex Polyhedron in R^n** . Journal of Optimization Theory and its Applications. Vol. 39. P.363-377.
- MAGRAB, E. B. **Integrated product and process design and development: The product realization process**. New York, USA, CRC Press LLC, 1997.
- NAKAZAWA, H. **Principles of Precision Engineering**. New York: Oxford University Press, 1994
- NBR 13723-1. **Aparelho doméstico de cocção a gás. Parte 1: Desempenho e Segurança**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas. Abril, 1999.
- NIST (National Institute of Standards and Technology). **Integration Definition for Functional Modeling (IDEF0)**. Gaithersburg, MD (USA): Federal Information Processing Standards Publication 183. December 21st 1993.
- OGLIARI, A. **Sistematização da concepção de produtos auxiliada por computador com aplicações no domínio de componentes de plásticos injetados**. PPGEM. UFSC. Florianópolis. 1999. Tese.

- PAHL, G.; BEITZ, W. **Engineering Design: a systematic approach**. 2. ed. Great Britain: Springer-Verlag London Limited, 1996.
- PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE Standards Committee. **A Guide to the Project Management Body of Knowledge**. Project Management Institute, Upper Darby, PA 19082 USA, 2000.
- PUGH, S. **Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering**. Addison Wesley, 1991.
- REICH, Y. **A critical review of General Design Theory**. In: Research in Engineering Design, 1995, Tampere. Proceedings. p. 1-18.
- REDTENBACHER, F. **Prinzipien der Machanik und des Maschinenbaus**. Mannheim: Bassermann 1852, p. 257-290.
- REULEAUX, F.; MOLL, C. **Konstruktionslehre für der Maschinenbaus**. Braunschweig: Vieweg 1854.
- RINGSTAD, P. **A comparasion of two approaches for functional decomposition – The Funciont/Means Tree and the Axiomatic Approach**. In: International Conference on Engineering Design, 1997, Tampere. Proceedings. p. 57-64.
- ROOZENBURG, N. F. M.; EEKELS, J. **Product design: fundamentals and methods**. Chichester: John Wiley & Sons, 1995.
- SCHLINK, H. **Cost Planning for Functions and Components in the design of engineering produtcs**. 3º Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de produtos – Florianópolis - SC. Outubro, 2000.
- SHIGLEY, J. E. **Elementos de máquiains**. 3.ed. Vol 2. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científico, 1984.

- SOZO, V.; et al. **Axiomatic Approach Application during the Product Conceptual Design Phase**. International Conference “MECHANIKA 2001”. Kaunas, Lithuania. April, 2001 p. 267-272.
- SOZO, V.; et al. **Avaliação de métodos de criatividade nas fases iniciais de projeto de produtos**. 3º Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de produtos – Florianópolis - SC. Outubro, 2000.
- SUH, N. P. **Axiomatic Design of Mechanical Systems**. American Society of Mechanical Engineers - ASME - Transactions, vol. 117, p. 2 - 10, June 1995.
- SUH, N. P. **Development of the Science Base for the Manufacturing Field through the Axiomatic Approach**. Robotics and Computer Integrated Manufacturing 1(3/4): 399-455, 1984.
- SUH, N. P.; et al. **On an Axiomatic approach to Manufacturing Systems**. Journal of Engineering for Industry, Transactions of ASME 100(2): 127-130, 1978.
- SUH, N. P; et al. **Exploratory Study of Constraints on Design by Funcional Requirements Manufacturing**. Annual report 1978-79, NSF Grant DAR 77-13296, Laboratory for Manufacturing and Productivity, MIT, August, 1979.
- SUH, Naum P. **The principles of Design**. New York: Oxford Press, 1990.
- ULLMAN, D. G. **The Mechanical Design Process**. New York: McGraw-Hill, 1992.
- YANG, K.; ZHANG, H. **A Comparison of TRIZ and Axiomatic Dsign**. Disponível em: <<http://www.triz-journal.com/archives/2000/08/indem.htm>>. Acesso em 24 de novembro de 2000.
- YOSHIKAWA, H. **Design Philosophy: The state of the art**. Annal of the CIRP, Vol. 38/2/1989.