

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

JOSÉ NILTON MARTINI

**MÉTODO PARA AUXILIAR AS ESCOLHAS DAS CONFIGURAÇÕES E DE
UMA ARQUITETURA DE ENFOQUE MODULAR PARA FAMÍLIAS DE
PRODUTOS**

FLORIANÓPOLIS

2008

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

JOSÉ NILTON MARTINI

**MÉTODO PARA AUXILIAR AS ESCOLHAS DAS CONFIGURAÇÕES E DE
UMA ARQUITETURA DE ENFOQUE MODULAR PARA FAMÍLIAS DE
PRODUTOS**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, área de Projeto de Sistemas Mecânicos, como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Fernando A. Forcellini, Dr. Eng.

FLORIANÓPOLIS

2008

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

JOSÉ NILTON MARTINI

**MÉTODO PARA AUXILIAR AS ESCOLHAS DAS CONFIGURAÇÕES E DE
UMA ARQUITETURA DE ENFOQUE MODULAR PARA FAMÍLIAS DE
PRODUTOS**

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de
DOUTOR EM ENGENHARIA – ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA
sendo aprovada em sua forma final

Florianópolis, 05 de dezembro de 2008.

Orientador: Prof. Fernando A. Forcellini, Dr. Eng.

Coordenador do POSMEC: Prof. Eduardo Alberto Fancello, D. Sc.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Fernando A. Forcellini, Dr. Eng. (Presidente)

Prof. Paulo Augusto Cauchick Miguel, Ph. D. (USP - Relator)

Prof. Sergio Luis da Silva, Dr. Eng. (UFSCar)

Prof. João Carlos Espíndola Ferreira, Ph. D.

Prof. Osmar Possamai, Dr. (EPS/UFSC)

RESUMO

Esta tese é motivada pela crescente necessidade manifestada pelos consumidores por produtos diferenciados e pelo reconhecimento das vantagens potenciais da adoção de arquiteturas de enfoque modular para gerar diversidade de oferta. O objetivo geral da tese é o desenvolvimento de um método integrado para auxiliar as escolhas das configurações e de uma arquitetura de enfoque modular para famílias de produtos. No método proposto, os atributos dos integrantes da família são definidos para que os produtos sejam aceitos pelos consumidores e a arquitetura (de enfoque modular) é definida para reduzir os custos do fabricante. As informações provenientes de medições das preferências dos consumidores são essenciais na definição dos atributos da família de produtos segundo o método desenvolvido. O processo de escolha dos atributos dos integrantes da família de produtos é evolutivo e a função objetivo é escrita para atender a meta do fabricante respeitando as preferências dos consumidores. Para definir a arquitetura de enfoque modular das famílias de produtos utiliza-se uma métrica heurística formulada ao longo do trabalho. A métrica estima os custos diferenciais entre as possíveis arquiteturas de enfoque modular para famílias de produtos e está ancorada em estimativas relativas dos custos de desenvolvimento e de preparação das interfaces e montagem entre as funções dos produtos. O processo de escolha da arquitetura de enfoque modular para a família de produtos também é evolutivo e seu alvo é a alternativa de menor custo relativo estimado, de acordo com a métrica proposta. Para manter a descrição da família de produtos da perspectiva de seus atributos coerente com sua descrição funcional (necessária para definição da arquitetura de enfoque modular), propõe-se uma ferramenta de acoplamento entre estes domínios que é integrada ao método proposto. Entre os pontos de originalidade desta tese, destacam-se: a integração do desenvolvimento de famílias de produtos segundo as perspectivas das configurações e da arquitetura (de enfoque modular); um procedimento híbrido para a medição das preferências dos consumidores; uma métrica de custos para ordenamento das alternativas de arquitetura de enfoque modular; uma ferramenta de acoplamento entre as descrições dos integrantes da família de produtos; e a definição dos cromossomos representativos das configurações e da arquitetura (de enfoque modular) para famílias de produtos e das operações de combinação e mutação para uso em algoritmos evolutivos. Ainda nesta tese, o método desenvolvido é aplicado nas definições das configurações e de uma arquitetura de enfoque modular para uma família de eletroportáteis. Os resultados oriundos do exemplo de aplicação do método desenvolvido permitem concluir que é possível ainda nos estágios iniciais do desenvolvimento de uma família de produtos definir racionalmente tanto as configurações como a arquitetura de enfoque modular de uma família de produtos, reduzindo seus custos e potencializando sua aceitação pelos consumidores. No exemplo de aplicação, as configurações obtidas para os produtos maximizam a receita e a participação de mercado do fabricante. A arquitetura de enfoque modular sugerida para a família de eletroportáteis do exemplo, por outro lado, minimiza os custos diferenciais entre as alternativas de arquitetura para os produtos.

Palavras-chave: Famílias de Produtos, Atributos dos Produtos, Arquiteturas de Enfoque Modular, Algoritmos Evolutivos.

ABSTRACT

The consumers' desire for diversity of products and the recognition that modular architectures have potential advantages to generate it are the motivations to present this thesis. The main goal of the thesis is to develop an integrated method to support the configurations and a modular architecture's definitions for families of products. In this method, the family members' attributes are defined to please the consumers and the modular architecture is defined to bring down the producer costs. According to the method developed, the consumers' preferences information is vital to define the family's attributes. In this thesis the family attributes' choosing process is evolutionary and the objective function must meet the producer goal and respect the consumers' preferences. To define a modular architecture to the family, a heuristic metric is formulated along the text. The metric estimates the differential costs between the potential modular architectures for families of products and is supported by relatives estimative of development costs and interface preparation and assemblage of the products' functions. The modular architecture's choosing process is also evolutionary and it targets the architecture with the lower estimated cost, according to the proposed metric. To keep the products family's functional description coherent with the description from the perspective of its attributes, a coupling tool is proposed between these domains and is integrated to the method developed. There are some originality points to highlight in the thesis: the integration of the architectural and the products attributes perspectives into a products development method; an hybrid approach to measure the consumers' preferences; a costs metric to sort out the alternatives of families architectures; a coupling tool to match the products' description from different domains; and the definition of chromosomes that represents the configurations and the architecture of products families as well as the combination and mutation operators used in evolutionary algorithms. Also in this thesis, the method developed is deployed to define the configurations and the modular architecture of a family of small home appliances. The results obtained from the example allow the conclusion that, even in the early stages of products development, it is possible to define rationally the configurations of a products family as well as its modular architecture, reducing the costs and widening the consumers' acceptance. The method's deployment example shows that the configurations obtained maximize the producer's income and market share. In the other hand, the small home appliances family's architecture suggested by the method minimizes the differential costs between the alternatives of modular architectures.

Keywords: Products Families, Products' Attributes, Modular Architectures, Evolutionary Algorithms.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1. INTRODUÇÃO	21
1.1 PROPOSTA DE PESQUISA.....	21
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	25
1.3 ESCOPO DA PESQUISA.....	26
1.4 INEDITISMO E CONTRIBUIÇÕES.....	26
1.5 MÉTODO DE PESQUISA.....	27
1.6 ESTRUTURA DA TESE.....	27
2. PREFERÊNCIAS DOS CONSUMIDORES	29
2.1 MEDIÇÃO DAS PREFERÊNCIAS DOS CONSUMIDORES.....	29
2.2 ABORDAGEM COMPOSICIONAL.....	31
2.3 ABORDAGEM DECOMPOSICIONAL – ANÁLISE CONJUNTA.....	33
2.4 ABORDAGENS HÍBRIDAS.....	39
2.4.1. Análise Conjunta Híbrida	40
2.4.2. Análise Conjunta Adaptativa	41
2.5 AS PREFERÊNCIAS NO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS.....	43
2.6 ALTERNATIVAS DE CONFIGURAÇÕES DAS FAMÍLIAS.....	46
2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	47
3. ARQUITETURAS MODULARES	49
3.1 PERSPECTIVAS DA MODULARIDADE.....	49
3.2 ARQUITETURA DE ENFOQUE MODULAR.....	52
3.3 MODELOS PARA OS PRODUTOS.....	57
3.4 MODULARIZAÇÃO DA ARQUITETURA DE PAHL E BEITZ.....	63
3.5 MÉTODOS DE MODULARIZAÇÃO.....	65
3.5.1. Método das Heurísticas de Stone et al. (1998)	67
3.5.2. Design Structure Matrix – DSM	69

3.5.3. <i>Modular Function Deployment</i> – MFD.....	72
3.5.4. Outros Métodos de Modularização	75
3.6 ALTERNATIVAS DE ARQUITETURAS DE ENFOQUE MODULAR.....	76
3.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	79
4. DEFINIÇÃO DAS CONFIGURAÇÕES	83
4.1 TRATAMENTO DAS INFORMAÇÕES.....	83
4.1.1. Estimativa de Participação de Mercado	84
4.1.2. Estimativa de Receita e Lucro	86
4.2 OS ALGORITMOS GENÉTICOS NA DEFINIÇÃO DAS CONFIGURAÇÕES.....	87
4.2.1. Codificação dos Cromossomos	90
4.2.2. Combinação dos Cromossomos	92
4.2.3. Mutação dos Cromossomos	94
4.3 ALTERNATIVAS DE SELEÇÃO E COMBINAÇÃO DOS CROMOSSOMOS.....	95
4.3.1. Comparativo das Alternativas de Seleção	96
4.3.2. Comparativo das Alternativas de Combinação	99
4.4 DEFINIÇÃO DAS CONFIGURAÇÕES DE UMA FAMÍLIA DE PRODUTOS.....	101
4.4.1. Atributos e Custos dos Produtos e as Configurações Concorrentes	102
4.4.2. Dados de Preferências dos Consumidores Virtuais	104
4.4.3. Resultados do Processo de Configuração dos Produtos	105
4.4.4. Resultados – Atributos para Máxima Utilidade dos Consumidores	106
4.4.5. Resultados – Atributos para Máxima Participação no Mercado	109
4.4.6. Resultados – Atributos para Máxima Receita	111
4.4.7. Resultados – Atributos para Máximo Lucro	112
4.5 ESPELHAMENTO DA DESCRIÇÃO DOS PRODUTOS.....	113
4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	116
5. DEFINIÇÃO DA ARQUITETURA	119
5.1 MÉTRICA HEURÍSTICA DE CUSTOS.....	119
5.2 ESTIMATIVA DO CUSTO DE DESENVOLVIMENTO.....	121
5.3 ESTIMATIVA DO CUSTO DE INTERFACES.....	125

5.4	POTENCIAL DE INTEGRAÇÃO DOS MÓDULOS.....	129
5.5	DEFINIÇÃO DA ARQUITETURA APLICANDO A MÉTRICA DE CUSTOS....	135
5.6	REPRESENTAÇÃO DAS INTERAÇÕES FUNCIONAIS.....	138
5.7	TRATAMENTO DAS INFORMAÇÕES FUNCIONAIS.....	140
5.7.1.	Cálculo do Número de Variações Funcionais.....	140
5.7.2.	Cálculo do Número de Interfaces de um Agrupamento Funcional.....	141
5.7.3.	Automatização do Cálculo do Número de Interfaces.....	143
5.8	OS ALGORITMOS GENÉTICOS NA DEFINIÇÃO DA ARQUITETURA.....	146
5.8.1.	Codificação dos Cromossomos.....	148
5.8.2.	Combinação dos Cromossomos.....	151
5.8.3.	Mutação dos Cromossomos.....	152
5.9	TESTE DA MÉTRICA E DO PROCESSO EVOLUTIVO.....	154
5.9.1.	Características Desejáveis e Proposta de um Modelo para Teste.....	155
5.9.2.	Arquitetura Esperada para o Teste Proposto.....	157
5.9.3.	Resultados Obtidos.....	157
5.10	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	163
6.	EXEMPLO DE APLICAÇÃO.....	165
6.1	DEFINIÇÃO DOS ATRIBUTOS DA FAMÍLIA.....	165
6.1.1.	Os Produtos Concorrentes e seus Atributos.....	166
6.1.2.	Os Atributos dos Produtos Concorrentes.....	167
6.1.3.	Os Níveis dos Atributos dos Produtos.....	167
6.1.4.	O Levantamento das Preferências dos Consumidores.....	169
6.2	CONFIGURAÇÕES ÓTIMAS.....	171
6.2.1.	Configuração dos Produtos para Máxima Utilidade.....	172
6.2.2.	Configuração dos Produtos para Máxima Receita (Com Restrição).....	174
6.2.3.	Configuração dos Produtos para Máxima Receita (Com <i>Display</i>).....	178
6.3	MODELO FUNCIONAL DO SISTEMA DE AQUECIMENTO E CONTROLE...	181
6.4	INFORMAÇÕES ADICIONAIS.....	184
6.5	RELAÇÕES ENTRE OS ATRIBUTOS E AS FUNÇÕES DO SISTEMA.....	185
6.6	O PROCESSO DE MODULARIZAÇÃO DA ARQUITETURA.....	188

6.6.1. Interpretação dos Módulos Formados.....	191
6.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	193
7. CONCLUSÕES.....	197
7.1 CONCLUSÕES ESPECÍFICAS.....	197
7.1.1. Integração das Abordagens.....	198
7.1.2. Ferramenta de Acoplamento.....	199
7.1.3. Métrica para Avaliação das Alternativas de Arquitetura.....	199
7.1.4. Emprego de Métodos Evolutivos Computacionais.....	200
7.1.5. Aplicabilidade do Método Desenvolvido.....	202
7.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS....	203
REFERÊNCIAS	205
APÊNDICE A – Algoritmos Genéticos.....	211
A.1 O PROCESSO EVOLUTIVO.....	211
A.2 TERMOS.....	214
A.3 CODIFICAÇÃO DOS INDIVÍDUOS E AVALIAÇÃO DA ADAPTAÇÃO.....	215
A.4 SELEÇÃO DOS INDIVÍDUOS.....	216
A.5 CRUZAMENTOS.....	219
A.6 MUTAÇÕES.....	220
A.7 O MODELO NK.....	221
APÊNDICE B – Medição das Preferências.....	225
B.1 ABORDAGEM DE MEDIÇÃO.....	225
B.2 ATRIBUTOS, NÍVEIS E CONFIGURAÇÕES PARA COMPARAÇÃO.....	226
B.3 FORMULÁRIO DE PESQUISA.....	228
B.4 LEVANTAMENTO DAS INFORMAÇÕES.....	231
B.5 TRATAMENTO DAS INFORMAÇÕES.....	233
B.6 INTERPRETAÇÃO DAS MEDIÇÕES.....	237
B.7 RESULTADOS DA PESQUISA DAS PREFERÊNCIAS.....	239

LISTA DE FIGURAS¹

Figura 1.1 – Modelo representativo do método proposto para desenvolvimento.....	25
Figura 2.1 – Estrutura das preferências do consumidor, abordagem composicional....	31
Figura 2.2 – Estrutura das preferências do consumidor.....	32
Figura 2.3 – Dados ordenados para os pares peças-veículos (GREEN e RAO).....	35
Figura 2.4 – Dados originais para os pares peças-veículos (GREEN e RAO).....	35
Figura 2.5 – Comparativo de importância e utilidade dos valores originais e estimados	37
Figura 2.6 – Dados ordenados para os modelos de cartão (GREEN e RAO).....	38
Figura 2.7 – Dados originais de utilidade para os modelos de cartões (GREEN e RAO)	38
Figura 2.8 – Estrutura de preferências das donas de casa.....	39
Figura 2.9 – Detalhes das alternativas de produtos apresentadas na medição das preferências dos consumidores (PAGE e ROSENBAUM).....	45
Figura 3.1 – Sistema com ênfase nos elementos (a) e nas relações (b) (FIXSON).....	50
Figura 3.2 – Abordagens (a) paramétrica, (b) configuracional e (c) fundamental da modularidade (FIXSON).....	51
Figura 3.3 – Comparativo entre as arquiteturas modular e integral (ULRICH).....	52
Figura 3.4 – Arquiteturas (A) totalmente integral, (B) de enfoque modular, e (C) totalmente modular dos produtos.....	53
Figura 3.5 –Arquiteturas (D) com alto grau de integração e (E) híbrida.....	54
Figura 3.6 – Alocação das funções do produto aos componentes físicos (ERENS e VERHULST).....	55
Figura 3.7 – Estrutura de Funções do produto (PAHL <i>et al.</i>).....	58
Figura 3.8 – Estruturação hierárquica de um sistema (HÖLTTÄ-OTTO).....	58
Figura 3.9 – Modelo de sistema IDEF0 (HÖLTTÄ-OTTO).....	59
Figura 3.10 – Exemplo de uma <i>Design Structure Matrix</i>	60
Figura 3.11 – Ilustração do <i>Object-Process Methodology</i> (HÖLTTÄ-OTTO).....	60
Figura 3.12 – ilustração de um modelo de sistema <i>Unified Modelling Language</i> (HÖLTTÄ-OTTO).....	61

1 As ilustrações desta tese (figuras e tabelas) seguem definições da ABNT, NBR 14724

Figura 3.13 – Comparativo entre os modelos de sistema para representação dos produtos (HÖLTTÄ-OTTO).....	62
Figura 3.14 – Diagrama de atividades da família de um detector de gás domiciliar (ASAN <i>et al.</i>).....	62
Figura 3.15 – Classificação dos módulos (PAHL <i>et al.</i>).....	63
Figura 3.16 – Sistemas modulares e mistos (PAHL <i>et al.</i>).....	65
Figura 3.17 – Três métodos tradicionais de modularização (YANG <i>et al.</i>).....	66
Figura 3.18 – Exemplo de aplicação da heurística de fluxo dominante (STONE <i>et al.</i>)	67
Figura 3.19 – Exemplo de aplicação da heurística da ramificação do fluxo (STONE <i>et al.</i>).....	68
Figura 3.20 – Aplicação da heurística da conversão-transmissão (STONE <i>et al.</i>).....	68
Figura 3.21 – Passos associados ao Método da Matriz de Modularidade (DAHMUS <i>et al.</i>).....	69
Figura 3.22 - ‘Modularização’ de um sistema através da diagonalização matricial....	70
Figura 3.23 – Representação das matrizes de interação e adequação (HUANG e KUSIAK).....	71
Figura 3.24 – Resultado do algoritmo de modularização (HUANG e KUSIAK).....	72
Figura 3.25 – Resumo das características dos <i>module drivers</i> (ROZENFELD <i>et al.</i>)..	74
Figura 3.26 – Anatomia da <i>Modular Indication Matrix</i> (ROZENFELD <i>et al.</i>).....	75
Figura 3.27 – Trabalhos publicados para definição de arquitetura (A) e a construção modular (M) (JOSE e TOLLENAERE).....	76
Figura 3.28 – Partições desconexas não vazias de um conjunto com 5 elementos (DICKAU).....	78
Figura 3.29 – Crescimento das alternativas de arquitetura de enfoque modular com o número de funções do produto.....	79
Figura 4.1 – Representação das utilidades parciais dos atributos para um grupo de N indivíduos.....	84
Figura 4.2 – Procedimento de busca das configurações dos integrantes de uma família de produtos (parte 1).....	88
Figura 4.3 – Procedimento de busca das configurações dos integrantes de uma família de produtos (parte 2).....	89

Figura 4.4 – Exemplo de gene que pode assumir 3 variações (alelos).....	90
Figura 4.5 – Genes definidores da configuração do produto.....	91
Figura 4.6 – Representação de um cromossomo definidor de uma família de 3 produtos.....	91
Figura 4.7 – Exemplo de cromossomos genitores de uma família de 3 produtos.....	92
Figura 4.8 – Exemplo de combinação de genes para formação de um novo cromossomo, fragmentação completa.....	93
Figura 4.9 – Exemplo de combinação de genes para formação de um novo cromossomo, um ponto de combinação.....	93
Figura 4.10 – Exemplo de combinação de genes para formação de um novo cromossomo, número aleatório de pontos de fragmentação.....	94
Figura 4.11 – Ilustração do processo de mutação de um cromossomo.....	95
Figura 4.12 – Comportamento evolucionário – métodos de seleção.....	98
Figura 4.13 – Comportamento evolucionário – formas de combinação.....	101
Figura 4.14 – Atributos dos automóveis e seus níveis (BAUER <i>et al.</i> 6).....	103
Figura 4.15 - Custos variáveis dos dos atributos (BAUER <i>et al.</i>).....	103
Figura 4.16 – Produtos concorrentes presentes no mercado.....	104
Figura 4.17 – Importâncias e utilidades de um consumidor virtual.....	105
Figura 4.18 – Comportamento da evolução para configuração de 2 produtos com máxima utilidade.....	107
Figura 4.19 – Comportamento da evolução para configuração de 3 produtos com máxima utilidade.....	108
Figura 4.20 – Configurações dos veículos da marca A para otimizar a utilidade dos consumidores.....	108
Figura 4.21 – Participação de mercado das configurações dos fabricantes B e C.....	109
Figura 4.22 – Comportamento da evolução para configuração de 2 produtos com máxima participação de mercado.....	110
Figura 4.23 – Configurações de veículos da marca A para maximizar a participação no mercado.....	110
Figura 4.24 – Participação de mercado das configurações dos fabricantes A, B e C.....	111
Figura 4.25 – Comportamento da evolução para configuração de 2 produtos para maximizar a receita.....	112

Figura 4.26 – Configurações de veículos da marca A para otimizar a receita.....	112
Figura 4.27 – Comportamento da evolução das configurações de veículos da marca A para otimizar o lucro.....	113
Figura 4.28 – Ferramenta para transformação de espaço da descrição dos produtos.	116
Figura 5.1 – Exemplo de descrição funcional dos produtos de uma família.....	122
Figura 5.2 – Exemplo de estimativa dos custos relativos de desenvolvimento das funções.....	122
Figura 5.3 – Custos estimados de desenvolvimento dos módulos.....	123
Figura 5.4 – Custos estimados de desenvolvimento das alternativas de arquiteturas.	125
Figura 5.5 – Estimativa dos custos relativos de montagem por tipo de interface.....	127
Figura 5.6 – Modelo funcional para os produtos da família.....	127
Figura 5.7 – Número de interfaces entre módulos para o exemplo sugerido.....	128
Figura 5.8 – Custos estimados de montagem entre módulos das alternativas de arquiteturas.....	129
Figura 5.9 – Relação entre os módulos, suas interfaces internas e as funções inter-relacionadas.....	132
Figura 5.10 – Potencial de integração dos módulos.....	133
Figura 5.11 – Custos estimados de montagem entre e intra módulos para as alternativas de arquiteturas.....	134
Figura 5.12 – Estimativa dos custos totais de montagem para as diversas alternativas de arquiteturas.....	135
Figura 5.13 – Variação do custo total em função de α e β para as alternativas de arquitetura.....	136
Figura 5.14 – Módulos sugeridos para a família de produtos.....	137
Figura 5.15 – Interação dinâmica entre os elementos funcionais (material).....	139
Figura 5.16 – Interação dinâmica entre os elementos funcionais (energia).....	139
Figura 5.17 – Interação dinâmica entre os elementos funcionais (sinal).....	139
Figura 5.18 – Alternativas de arquitetura e número de interfaces intra e inter módulos.....	145
Figura 5.19 – Fluxograma da aplicação dos Algoritmos Genéticos à definição da arquitetura de uma família de produtos.....	147
Figura 5.20 – Combinação de dois cromossomos genitores para a formação de nova	

geração.....	152
Figura 5.21 – Opções de mutação de um cromossomo por permutação.....	153
Figura 5.22 – Opções de mutação de um cromossomo por aglutinação ou cisão dos agrupamentos funcionais.....	154
Figura 5.23 – Estrutura de Funções para os integrantes de uma família de 3 produtos	156
Figura 5.24 – Variações das funções para cada integrante da família de produtos.....	156
Figura 5.25 – Estimativas de custos relativos de desenvolvimento das funções.....	156
Figura 5.26 – Comportamento instável da seleção por <i>Rank</i>	158
Figura 5.27 – Evolução dos custos estimados das alternativas de arquitetura.....	160
Figura 5.28 – Arquitetura obtida para a família de produtos: Evolução A.....	162
Figura 5.29 – Arquitetura obtida para a família de produtos: Evolução B.....	162
Figura 6.1 – Descrição dos mini fornos elétricos concorrentes.....	167
Figura 6.2 – Níveis dos atributos dos produtos para o exemplo de aplicação.....	168
Figura 6.3 – Comparativo das importâncias dos atributos (consumidores médio).....	170
Figura 6.4 – Comportamento da utilidade quando os preços variam (consumidor médio).....	171
Figura 6.5 – Comportamento evolutivo da configuração de máxima utilidade.....	173
Figura 6.6 – Comportamento evolutivo da configuração de um mini forno da marca Hot.....	174
Figura 6.7 – Variação da receita estimada com o aumento de integrantes da família	178
Figura 6.8 – Comportamento evolutivo para configuração de uma família de 3 produtos.....	180
Figura 6.9 – Configurações dos 3 produtos da família de mini fornos elétricos da marca Hot.....	180
Figura 6.10 – Descrição das funções do sistema de aquecimento e controle dos mini fornos.....	182
Figura 6.11 – Estrutura de Funções para o sistema de aquecimento e controle dos mini fornos.....	183
Figura 6.12 – Matriz, tipo DSM, para trocas de energia entre as funções do sistema	184
Figura 6.13 - Matriz, tipo DSM, para trocas de sinal entre as funções do sistema.....	185
Figura 6.14 – Relações entre os atributos dos produtos e as funções do sistema.....	187

Figura 6.15 – Estimativa relativa dos custos de desenvolvimento das funções.....	188
Figura 6.16 – Estimativa relativa dos custos de preparação e montagem das interfaces	188
Figura 6.17 – Comportamento evolutivo dos custos estimados das alternativas de arquitetura.....	190
Figura 6.18 – Arquitetura sugerida pelo processo evolutivo A.....	191
Figura 6.19 – Módulos formados pelo processo de modularização da arquitetura.....	192
Figura A.1 – Fluxograma representativo de um Algoritmo Genético.....	213
Figura A.2 – Seleção e recombinação dos indivíduos de uma população (WHITLEY)	216
Figura A.3 – Seleção dos indivíduos de acordo com o Método da Roleta e Seleção por Ordenamento (GONÇALVES).....	218
Figura A.4 – Intervalos de seleção dos indivíduos para o uso com Amostragem Estocástica Universal.....	219
Figura A.5 – Valores de adequação para os elementos e para o ‘produto’ para $K=0$ e 2 (BRABAZON e MATTHEWS).....	222
Figura A.6 – Interpretação gráfica da adequação ($N=3$, $K=0$) (BRABAZON e MATTHEWS).....	222
Figura A.7 – Interpretação gráfica da adequação ($N=3$, $K=2$) (BRABAZON e MATTHEWS).....	223
Figura B.1 – Configurações ortogonalizadas para comparação.....	227
Figura B.2 – Pares de configurações dos produtos para comparação.....	228
Figura B.3 – Formulário para avaliação compositiva das utilidades parciais.....	229
Figura B.4 – Primeira parte do formulário para avaliação decompositiva.....	230
Figura B.5 – Segunda parte do formulário para avaliação decompositiva.....	231
Figura B.6 – Pesos dos atributos e seus níveis segundo um consumidor potencial....	233
Figura B.7 – Utilidades parciais de um consumidor potencial.....	234
Figura B.8 – Estimativa da distribuição da probabilidade das diferenças entre utilidades.....	235
Figura B.9 – Sistema linear para ajuste das preferências dos consumidores.....	237
Figura B.10 – Comparativo das importâncias dos atributos, com e sem correção....	238
Figura B.11 – Utilidades Parciais dos 42 entrevistados.....	240

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Comparação entre os métodos de seleção dos cromossomos – Roleta....	96
Tabela 4.2 – Comparação entre os métodos de seleção dos cromossomos – <i>Rank</i>	97
Tabela 4.3 – Comparação entre os métodos de seleção dos cromossomos – Torneio..	97
Tabela 4.4 – Comparação entre as formas de combinação dos cromossomos – múltiplos.....	99
Tabela 4.5 – Comparação entre as formas de combinação dos cromossomos – todos os genes.....	100
Tabela 5.1 – Resultados das execuções do processo evolutivo.....	161
Tabela 6.1 – Configuração de 1 produto para máxima receita.....	175
Tabela 6.2 – Configurações de 2 produtos para máxima receita.....	176
Tabela 6.3 – Configurações de 3 produtos para máxima receita.....	177
Tabela 6.4 – Configurações de uma família de 3 produtos para máxima receita, com <i>display</i>	179
Tabela 6.5 – Resultados obtidos para a definição da arquitetura da família de produtos	189

1 INTRODUÇÃO

Os consumidores estão mais exigentes e demandam produtos diferenciados que satisfaçam suas necessidades e gostos individuais. Para agradar estes consumidores, os fabricantes devem oferecer configurações de produtos que atendam a segmentos cada vez menores de mercado, como os micro-mercados e, em alguns casos, até configurações de produtos individualizadas (KOTLER, 1989). Enquanto os segmentos de mercado se tornam menores e os consumidores demandam produtos variados, a competição entre os fabricantes se intensifica alimentada pela convergência industrial, pela desregulamentação, pela globalização e pelas redes de trabalho (SAWHNEY, 1998). Diante desta realidade, os fabricantes devem enfrentar o duplo desafio de oferecer a variedade de configurações de produtos desejada pelos consumidores com custos baixos de desenvolvimento e produção.

Oferecer a variedade de produtos desejada pelos consumidores e, ao mesmo tempo, adotar uma arquitetura favorável à redução dos custos de desenvolvimento e fabricação motivaram esta proposta de pesquisa. Em especial, duas definições tomadas no início do processo de desenvolvimento de produtos variados são os objetos da pesquisa. A primeira delas é a definição da dimensão da variedade (quantidade de produtos variados) e da configuração dos produtos oferecidos aos consumidores, a segunda é a definição de uma arquitetura de enfoque modular para estes produtos.

O detalhamento da pesquisa, seguindo as motivações apresentadas nos parágrafos anteriores, seus objetivos, o escopo e o método da pesquisa são mostrados ao longo deste capítulo, assim como os tópicos de originalidade da pesquisa e as contribuições esperadas do trabalho. A última seção é reservada à apresentação da organização dos demais capítulos da tese.

1.1 PROPOSTA DE PESQUISA

A medição e interpretação das necessidades dos consumidores são imprescindíveis na definição de quais devem ser as configurações dos produtos oferecidos aos consumidores. O uso de abordagens compositivas, decompositivas e híbridas para medição das preferências dos

consumidores auxilia a escolha de quais são as melhores configurações para um ou vários produtos. Nestas abordagens de medição das preferências dos consumidores pode-se aferir a importância dada pelos consumidores aos atributos dos produtos e, posteriormente, definir as características dos produtos que permitem, por exemplo, conquistar uma parcela desejada do mercado, ou, então, maximizar receitas e lucros (GREEN e SRINIVASAN, 1990).

O tratamento das informações provenientes das medições das preferências dos consumidores em ambientes com muitos competidores e grande variedade de opções, porém, ainda é incipiente e, muitas vezes, falham em prever o comportamento do mercado (ULRICH *et al.*, 1998). Para o caso particular da definição conjunta das configurações de vários produtos, o número de alternativas, geralmente, é muito grande. O número exato de alternativas destas configurações pode ser calculado pelo número binomial. Isto significa que com números crescentes de atributos e seus níveis também cresce a dificuldade de escolha das melhores configurações para um determinado objetivo do fabricante. Definir, portanto, quais são as configurações de um conjunto de produtos não é trivial. Devido ao número significativo de alternativas de configurações dos produtos, processos de escolha computacionais aplicáveis em populações discretas devem ser empregados.

A partir da definição das configurações dos produtos oferecidos ao mercado, inicia-se o processo de desenvolvimento técnico para produção. O desenvolvimento técnico para oferecer a variedade de produtos desejada pelos consumidores a custos razoáveis pode estar baseado no processo ou no produto. A opção de oferecer variedade de produtos baseada nos processos busca meios de produção e distribuição flexíveis que permitam acomodar alta variedade com custos razoáveis de fabricação enquanto que a opção de oferecer diversidade de oferta a partir do produto busca alternativas que resultam em baixa variedade de componentes e complexidade de montagem (FISHER *et al.*, 1999).

O desenvolvimento de famílias de produtos é comum quando se pretende gerar variedade de oferta baseada no produto. Para Erens e Vehulst (1997) uma família de produtos é definida como um conjunto de produtos com interfaces internas idênticas (interfaces entre os componentes do produto), para todas as variantes nos domínios funcional, tecnológico e físico, possibilitando a troca de componentes.

Uma alternativa de desenvolvimento de famílias de produtos baseada no produto é derivada

do conceito de arquitetura. Para Ulrich (1995), a arquitetura dos produtos é definida pela forma como são arranjadas as funções do produto, pela relação função-componente, e pela escolha das interfaces entre os componentes. Nos extremos dos tipos descritos na literatura, encontram-se as arquiteturas totalmente modular e totalmente integral dos produtos. A arquitetura totalmente modular define um mapeamento chamado um-para-um entre as funções e os componentes físicos do produto e como requisito adicional as interfaces entre os componentes são desacopladas. Já a arquitetura integral define um mapeamento complexo entre as funções e os componentes físicos do produto (não-um-para-um) e as interfaces entre os componentes são, geralmente, acopladas (ULRICH, 1995). As arquiteturas de enfoque modular estão entre estes extremos e são caracterizadas por relações bem definidas entre os componentes e as funções executadas pelos produtos.

A definição da arquitetura dos produtos pode, entre outros benefícios, reduzir os custos de desenvolvimento, permitir a atualização, racionalizar a produção, facilitar a reciclagem, e desenvolver produtos variados de maneira econômica. Nas famílias de produtos desenvolvidas segundo uma arquitetura de enfoque modular, a variedade de opções é obtida com a substituição dos componentes que executam funções específicas. A execução de uma função, ou mais de uma, por apenas um componente permite, por exemplo, a substituição deste componente por outro de desempenho diferente sem interferir nas demais funções do produto. Permite, também, a substituição do componente por outro cujo princípio de solução representa uma evolução do produto, novamente sem interferir nas demais funções presentes. Já a adoção de módulos comuns aos integrantes destas famílias de produtos reduzem os esforços de desenvolvimento e aumentam a economia de escala na manufatura (ERENS e VERHULST, 1997).

Nos estágios iniciais do desenvolvimento, a alocação das funções aos componentes físicos (que serão desenvolvidos mais tarde no processo) pode ser definida para que a arquitetura da família de produtos apresente características desejadas de integração ou modularidade. A escolha adequada do mapa função-componente abre um leque de possibilidades para os produtos, tanto em termos de racionalização do esforço de desenvolvimento e produção como em termos de criação de diversidade de oferta. A adoção de uma arquitetura de enfoque modular para famílias de produtos ainda nos estágios iniciais do desenvolvimento, remete,

portanto, à escolha das funções que serão desenvolvidas conjuntamente em módulos.

A definição de uma arquitetura de enfoque modular para as famílias de produtos envolve, assim como a definição das configurações de seus integrantes, a pesquisa de um extenso conjunto de possibilidades. Como visto, entre a arquitetura totalmente integral e a arquitetura totalmente modular, existem muitas alternativas de arquiteturas de enfoque modular. A quantidade de arquiteturas de enfoque modular do produto, ou família de produtos, é calculada pelo número de Bell (os números de Bell fornecem o número de partições desconexas não vazias que podem ser obtidas de um conjunto com n elementos) (DICKAU, 2006). Com o crescimento do número de funções do produto (ou de uma família de produtos), o conjunto de alternativas de arquiteturas de enfoque modular também cresce. Para um número de funções significativo, a investigação das melhores alternativas de arquitetura de enfoque modular para a família de produtos não pode ser feita apenas por inspeção. Assim como a escolha das configurações dos integrantes da família de produtos, também na definição da arquitetura de enfoque modular para a família de produtos é preciso o auxílio de processos de escolha computacionais que investiguem domínios discretos.

Pelo exposto, as definições das configurações e da arquitetura de uma família de produtos dependem: a) dos objetivos almejados pelo fabricante; b) das preferências dos consumidores; c) das funções executadas; e d) das características técnicas dos produtos. Como integrar estas informações num método que resulte nas definições das configurações e numa alternativa de arquitetura de enfoque modular para a família de produtos é a questão principal de pesquisa. De forma simplificada, a Figura 1.1 ilustra as principais informações, interações e ações necessárias de uma proposta de método para atingir o objetivo desejado. Nesta figura, as informações de preferências dos consumidores são combinadas com os objetivos do fabricante e, empregando um processo de escolha, as configurações dos produtos são definidas. Os modelos funcionais dos produtos e a diversidade de configurações, segundo o modelo, definem a variedade funcional necessária para formar a família. Empregando um processo de escolha e utilizando as informações da variedade funcional necessária para a família e suas interações funcionais a arquitetura para a família de produtos pode ser definida.

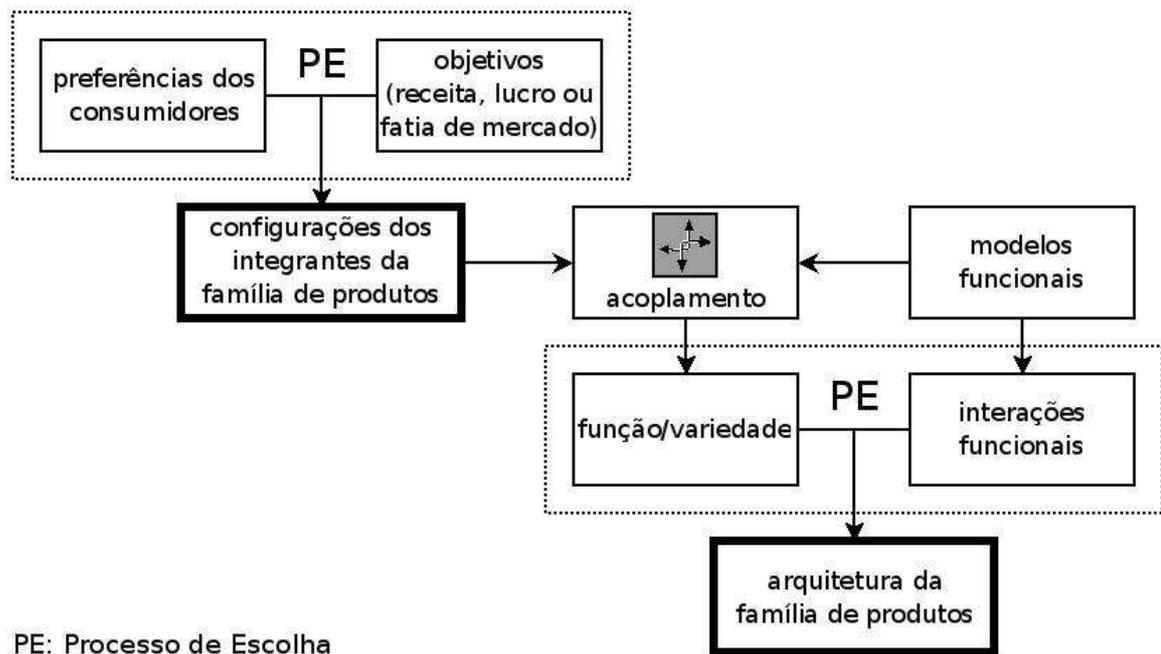


Figura 1.1 – Modelo representativo do método proposto para desenvolvimento

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Nesta seção são apresentados os objetivos da pesquisa. Apresenta-se, inicialmente, o objetivo geral da pesquisa e, em seguida, os objetivos específicos, todos relacionados ao modelo representativo do método ilustrado pela Figura 1.1.

O objetivo geral da pesquisa é desenvolver um método para auxiliar as escolhas das configurações e de uma arquitetura de enfoque modular para famílias de produtos. Para atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são estabelecidos:

- Integrar as abordagens de configuração e de arquitetura no desenvolvimento de famílias de produtos;
- Estabelecer o acoplamento entre os atributos e as funções dos produtos;
- Formular uma métrica de auxílio ao ordenamento das alternativas de arquitetura de enfoque modular para famílias de produtos;

- Definir cromossomos representativos das configurações e da arquitetura (de enfoque modular) para famílias de produtos e das operações de combinação e mutação para uso em algoritmos evolutivos; e
- Sistematizar a busca das alternativas mais atrativas de configurações e de arquitetura empregando os passos dos Algoritmos Genéticos.

1.3 ESCOPO DA PESQUISA

A proposta de pesquisa está restrita às fases iniciais do processo de desenvolvimento de produtos, onde são definidos seus atributos e arquitetura, segundo visão de Rozenfeld *et al.* (2005). Neste trabalho, a definição da arquitetura é limitada à sugestão dos agrupamentos funcionais para desenvolvimento posterior conjunto (em módulos). Não é objetivo desta pesquisa o detalhamento das alternativas de arquiteturas de enfoque modular sugeridas. Também não é tratado neste trabalho o desenvolvimento das interfaces entre os componentes da família de produtos.

1.4 INEDITISMO E CONTRIBUIÇÕES

O primeiro componente original desta tese é o desenvolvimento do método integrando as abordagens para as definições das configurações dos integrantes de uma família de produtos e da sua arquitetura. Um dos pontos chave desta integração é a ferramenta de acoplamento da descrição dos produtos entre estes domínios que é construída ao longo da tese.

Ainda no caminho para atingir o objetivo principal da tese, espera-se contribuir com a área de conhecimento do desenvolvimento de produtos com propostas originais de medição híbridas das preferências dos consumidores e com o tratamento destas informações. O trabalho também deve contribuir com o desenvolvimento de técnicas e métodos computacionais de auxílio para a escolha dos atributos dos integrantes de uma família de produtos.

Além das contribuições originais citadas nos parágrafos anteriores, pode-se listar, ainda, outros pontos de ineditismo desta tese. Um destes pontos é a formulação de uma métrica heurística que ordene as alternativas de arquitetura de enfoque modular mais interessantes

para as famílias de produtos. Também inéditas são as sugestões de cromossomos e operadores para o emprego de Algoritmos Genéticos ao processo de busca das melhores opções de arquiteturas de enfoque modular para a família de produtos.

1.5 MÉTODO DE PESQUISA

Esta tese pode ser classificada como uma pesquisa construtiva, no sentido que uma (nova) solução para um problema é desenvolvida (LASSENIUS *et al.*, 2001). A pesquisa proposta é de natureza aplicada, ou seja, dirigida à solução de problemas específicos e é abordada tanto de forma qualitativa (desenvolvimento de procedimentos e métodos) como de forma quantitativa (simulações computacionais) (SILVA e MENEZES, 2001).

A pesquisa desenvolvida neste trabalho envolve três passos: revisão bibliográfica, proposta e detalhamento do método, e aplicação e validação do método. O modelo representativo do método que é construído ao longo da tese é ilustrado pela Figura 1.1. Parte desta construção é a medição das preferências dos consumidores segundo abordagem híbrida (parte compositiva e parte decompositiva) com método específico proposto nesta tese. As configurações dos produtos são definidas considerando os objetivos do fabricante e empregando implementações computacionais de algoritmos evolutivos. Ainda para a construção do método ilustrado na Figura 1.1, a arquitetura de enfoque modular é obtida com a extração de informações de modelos funcionais que são combinadas com a variedade de configurações desejada e com um critério de avaliação, também definido ao longo da tese, das alternativas de arquitetura. O processo de escolha da melhor arquitetura depende, ainda, da construção de algoritmos evolutivos computacionais específicos para o problema. O método é validado em testes e simulações descritos na tese e a aplicabilidade do método é testada em um estudo de caso.

1.6 ESTRUTURA DA TESE

Este documento está organizado em 7 capítulos e 2 apêndices. No primeiro capítulo são apresentados o problema, as propostas, os objetivos, o escopo e o método de pesquisa. Os próximos capítulos, 2 e 3, são dedicados à revisão bibliográfica dos assuntos ligados à pesquisa proposta. Os Capítulos 4 e 5 são dedicados ao detalhamento do método proposto. O

Capítulo 6 apresenta um exemplo de aplicação do método desenvolvido e o Capítulo 7 as conclusões finais do trabalho. O Apêndice A apresenta uma introdução aos algoritmos evolutivos, com atenção especial aos Algoritmos Genéticos. O formulário de pesquisa utilizado para medir as preferências dos consumidores e a proposta de tratamento destas informações encontra-se no Apêndice B.

O problema da configuração dos integrantes de famílias de produtos é abordado nos Capítulos 2 e 4. No Capítulo 2 são revisadas as formas de medição das preferências dos consumidores e seu uso no desenvolvimento de produtos. No Capítulo 4 as informações de preferências dos consumidores são inseridas em um algoritmo de busca para a definição das configurações mais interessantes da perspectiva da satisfação dos consumidores ou da participação de mercado, receita e lucro. A ferramenta para espelhar os atributos nas funções executadas pelos produtos também é descrita neste capítulo

Os Capítulos 3 e 5 tratam da questão da arquitetura das famílias de produtos. No Capítulo 3 estão definidos os conceitos de arquitetura e modularidade. A revisão bibliográfica das alternativas para modularização (da arquitetura) dos produtos também é apresentada neste capítulo. O detalhamento do método de modularização da arquitetura proposto nesta tese está no Capítulo 5. Ainda no Capítulo 5 o processo de escolha de uma arquitetura de enfoque modular para a família de produtos baseado nos Algoritmos Genéticos é apresentado.

No Capítulo 6 ilustra-se, com um exemplo, a aplicação do método descrito nesta tese. No exemplo de aplicação desenvolve-se uma família de mini fornos elétricos, da perspectiva da definição das configurações de seus integrantes e da arquitetura. Por fim, no Capítulo 7 os objetivos estabelecidos nesta tese são confrontados com os resultados obtidos da aplicação do método desenvolvido e a síntese das conclusões do trabalho é apresentada.

2 PREFERÊNCIAS DOS CONSUMIDORES

Este capítulo é dedicado à apresentação das abordagens para a medição das preferências dos consumidores e de sua aplicação ao desenvolvimento de produtos. O capítulo está organizado em 7 seções. Na primeira seção as abordagens empregadas para medir as preferências dos consumidores são apresentadas. Estas abordagens, composicional, decomposicional e híbridas, são detalhadas nas seções seguintes. A quinta seção lista várias aplicações das medições das preferências dos consumidores no desenvolvimento de produtos e, também, do desenvolvimento de famílias de produtos. A seção seguinte trata do número de alternativas de configurações dos integrantes de uma família de produtos e seu cálculo, conhecendo a dimensão da família e o número de atributos (e seus níveis) utilizados para descrevê-la. A última seção apresenta as considerações finais sobre o tema abordado no capítulo.

2.1 MEDIÇÃO DAS PREFERÊNCIAS DOS CONSUMIDORES

Segundo Tassarolo (2004) é com base na diferença de utilidade entre as configurações disponíveis no mercado que os consumidores definem qual produto adquirir. A utilidade pode ser definida como a satisfação psicológica oriunda da compra dos produtos (MAANZ, 2008). O processo de aquisição de produtos, considerando a diferença da utilidade entre eles, pode ser esquematizado em três passos:

- Análise comparativa da oferta e destaque das diferenças entre os produtos.
- Estimativa da utilidade de cada produto baseada nas diferenças entre eles.
- Escolha do produto com utilidade máxima.

A utilidade de um determinado produto pode ser obtida pela composição das utilidades dos seus atributos. Por atributo entende-se as características que estão presentes nos produtos para atrair os consumidores (MAANZ, 2008). No modelo aditivo, que é ilustrado pela expressão (2.1), compõe-se a utilidade do produto somando-se as utilidades dos seus atributos. Nesta expressão, U_x é a utilidade da x -ésima configuração do produto e u_{ij} é a utilidade do j -ésimo nível do i -ésimo atributo presente na configuração avaliada.

$$U_x = \sum_i u_{ij} \quad (2.1)$$

As empresas que conseguem medir a utilidade dos níveis dos possíveis atributos se colocam na posição privilegiada de projetar e desenvolver os produtos que resultam na máxima satisfação dos clientes (TESSAROLO, 2004). Portanto, o conhecimento das utilidades das diversas configurações possíveis dos produtos (seus atributos e níveis) para os clientes potenciais é fundamental para o desenvolvimento de produtos de sucesso.

A maneira mais simples de medir as preferências dos consumidores é perguntando diretamente a eles. Nesta abordagem, porém, os consumidores costumam escolher as marcas mais conhecidas, os produtos de melhor desempenho, os preços e taxas de juros mais baixos, e assim por diante, resultando em poucas informações relevantes para o desenvolvimento de novos produtos a partir do questionamento direto.

Diante desta realidade, formas estruturadas de medir as preferências dos consumidores foram desenvolvidas, que podem ser classificadas de acordo com três abordagens (GREEN e SRINIVASAN, 1990). A primeira delas é chamada de abordagem composicional. A segunda é a abordagem decomposicional, representada pela Análise Conjunta. A terceira maneira combina a abordagem composicional e decomposicional para a levantamento da estrutura de preferências dos consumidores e chama-se abordagem híbrida.

Na abordagem composicional pede-se aos consumidores que avaliem comparativamente os vários níveis dos atributos dos produtos. Desta avaliação podem ser estimadas as utilidades destes atributos que posteriormente são utilizados para estimar a utilidade de um produto em particular (obtida pela soma das utilidades dos atributos presentes na configuração). Na abordagem decomposicional, os consumidores avaliam comparativamente várias alternativas de configurações de produtos (formado de certos atributos) e a partir desta avaliação são obtidas as utilidades dos atributos, posteriormente utilizadas para o cálculo da utilidade de uma variante específica do produto. A abordagem híbrida, como já mencionado, utiliza as medições da utilidade dos atributos que foram obtidas tanto de maneira composicional como decomposicional. Estas três abordagens são detalhadas nas próximas seções.

2.2 ABORDAGEM COMPOSICIONAL

Na abordagem composicional proposta por Green e Srinivassan (1990), chamada *self-explicated*, os indivíduos pesquisados, inicialmente, avaliam relativamente os níveis de cada atributo do produto, numa escala que varia, por exemplo, entre 0 e 10 (o nível de maior preferência deve receber 10 e o de menor preferência 0). Em seguida, os mesmos indivíduos devem distribuir 100 pontos entre os atributos, de maneira a refletir sua importância relativa. A Estrutura de Preferência dos Consumidores pode ser construída multiplicando a importância dada aos atributos com os valores dados aos níveis investigados (GREEN e SRINIVASSAN, 1990).

Para ilustrar a abordagem composicional, imagine um produto com dois atributos, A e B. O atributo A podendo variar em três níveis (A1, A2 e A3), e o atributo B em dois (B1 e B2). Um respondente poderia avaliar os níveis de cada atributo da seguinte forma: A1=6, A2=0, A3=10, B1=0 e B2=10. O mesmo respondente distribuiu os 100 pontos entre os atributos A e B na seguinte proporção: A=40 e B=60. A estrutura de preferências deste respondente, construída de acordo com as sugestões do primeiro parágrafo, é ilustrada no quadro da Figura 2.1.

Atributos	Níveis	Preferência
A	A1	240
	A2	0
	A3	400
B	B1	0
	B2	600

Figura 2.1 – Estrutura das preferências do consumidor, abordagem composicional

As mesmas informações do quadro da Figura 2.1 podem ser organizadas na forma mostrada no quadro da Figura 2.2. Neste quadro as preferências dos consumidores são decompostas na importância relativa das características dos produtos, atributos, e na utilidade de cada nível do atributo. Usualmente, a utilidade de cada nível dos atributos é apresentada como a distância

normalizada entre a utilidade de um nível específico e a média das utilidades dos níveis de um atributo.

Atributos	Importância	Níveis	Utilidade
A	40%	A1	0,067
		A2	-0,533
		A3	0,467
B	60%	B1	-0,500
		B2	0,500

Figura 2.2 – Estrutura das preferências do consumidor

A grande vantagem da abordagem composicional, segundo Green e Srinivassan (1990), é sua simplicidade e, portanto, ela pode ser utilizada mesmo quando o número de atributos do produto é muito grande. Porém, ainda de acordo com Green e Srinivassan (1990), podem ser identificados vários problemas na construção direta da estrutura de preferências dos consumidores. O primeiro deles ocorre quando existe forte correlação entre os atributos. Nestas situações os indivíduos têm dificuldades para avaliar os níveis de um atributo mantendo todo o resto igual. Ademais, alguns fatores socialmente sensíveis, como salário, tendem a apresentar viés de resposta quando perguntados aos indivíduos diretamente. Nesta estruturação das preferências dos consumidores, o modelo aditivo é assumido verdadeiro (literalmente), o que é relatado como segundo problema da abordagem. O terceiro problema é a ocorrência da contagem duplicada quando existe redundância entre os atributos (por exemplo, economia e quilômetros por litro de combustível). O quarto problema está relacionado aos atributos quantitativos. Nestes casos, a construção direta tende a apresentar valores relativos lineares. Finalmente, como não existe um perfil completo das alternativas de produto, não são obtidas avaliações de possibilidade de compra dos mesmos (GREEN e SRINIVASSAN, 1990).

2.3 ABORDAGEM DECOMPOSICIONAL – ANÁLISE CONJUNTA

A Análise Conjunta utiliza uma abordagem decomposicional para medir, quantitativamente, a importância relativa de um atributo em comparação com outro. Na Análise Conjunta, o consumidor é solicitado a fazer um julgamento de substituição, ou escolha, entre níveis de atributos, fornecendo informações úteis ao desenvolvimento de novos produtos (AAKER *et al.*, 2004, p.614).

A Análise Conjunta pode ser definida como um método decompositivo que permite a quantificação do *trade off* do cliente entre os atributos dos produtos, utilizando um modelo de decisão definido *a priori*, baseado na avaliação pelos clientes dos produtos caracterizados por dois, ou mais, atributos, cada um deles com dois ou mais níveis, empregando o princípio do *Experimental Design* (TESSAROLO, 2004).

Na operacionalização da Análise Conjunta, é necessário assumir uma forma funcional para o modelo de preferência. Entre as formas funcionais adotadas, as mais comuns são:

- *Part Worth Model*
- *Vector Linear Model*
- *Ideal Point Model*

De forma geral, as três formas funcionais citadas podem ser representadas pelas seguintes expressões, (2.2), (2.3) e (2.4), para o *Part Worth Model*, *Linear Vector Model* e *Ideal Point Model*, respectivamente.

$$Y_i = \sum_k \sum_j w_{kj} X_{kji} + e_i \quad (2.2)$$

$$Y_i = \alpha + \beta_k X_{ki} + e_i \quad (2.3)$$

$$Y_i = \alpha' + \beta'_k (X_{ki} - X_{kl})^2 + e_i \quad (2.4)$$

Nestes modelos:

- Y_i é a utilidade da i -ésima configuração do produto.
- w_{kji} é um coeficiente oportuno, chamado *part worth* relativo ao nível j do atributo k .
- X_{kij} é uma variável binária, também conhecida como *dummy*, que assume o valor 1 quando o nível j do atributo k é presente na configuração e 0 quando não está presente.
- e_i é o erro devido à característica estatística do procedimento.
- X_{ki} é o valor do k -ésimo atributo na i -ésima configuração do produto.
- α é o coeficiente linear do modelo.
- β_k é o efeito do atributo k sobre o modelo.
- X_{ki} é o nível ideal do atributo k .

Atualmente a Análise Conjunta é utilizada intensivamente no desenvolvimento de novos produtos, porém as bases desta ferramenta surgiram há pouco mais de 30 anos. No início dos anos 1970, Green e Rao (1971) publicaram um importante trabalho sobre o efeito conjunto de duas ou mais variáveis independentes no ordenamento de uma variável dependente, construída sobre os procedimentos inicialmente desenvolvidos por matemáticos. A aplicação da medição conjunta foi apresentada com 3 problemas e se tornaram, com o passar dos anos, a base da Análise Conjunta.

O primeiro problema apresentado por Green e Rao (1971) é utilizado para ilustrar a aplicação da medição conjunta de duas variáveis. Para tanto, são utilizadas dois quadros. O primeiro é o ordenamento feito por um planejador de mídia para a efetividade de pares peças publicitárias – veículos de divulgação, quadro da Figura 2.3. Este ordenamento foi construído a partir do quadro da Figura 2.4, que representa os pesos originais tanto para as peças publicitárias como para os veículos de divulgação. Os pesos originais, obviamente, são desconhecidos pelo planejador de mídia e os valores dos pares são obtidos por combinação aditiva (expressão (2.1)). Os autores propõem a reconstrução relativa dos intervalos originais utilizando apenas os dados disponíveis no quadro da Figura 2.3.

No quadro da Figura 2.3 os pares foram ordenados pelo planejador de mídia para que os

números maiores representem maior efetividade do par peça promocional – veículo de divulgação. Ainda no quadro da Figura 2.3, números fracionados repetidos indicam mesma efetividade de dois pares. Os pesos originais dos pares do quadro da Figura 2.4 são o resultado da soma dos valores dados às peças promocionais e aos veículos de divulgação (por exemplo, o valor do par $a_3(6):c_2(6)$ é 12). Neste problema, a peça promocional e o veículo de divulgação podem ser tratados como atributos da campanha de divulgação da nova droga.

Peças	Veículos de Divulgação				
	v1	v2	v3	v4	v5
p1	1	3	8,5	16,5	19,5
p2	2	5	11	21	24,5
p3	4	7	13	24,5	26
p4	6	10	15	28	30
p5	8,5	12	19,5	31,5	33
p6	14	18	28	35	36
p7	16,5	22,5	31,5	37	38
p8	22,5	28	34	39	40

Figura 2.3 – Dados ordenados para os pares peças-veículos (GREEN e RAO, 1971)

Peças (valor)	Veículos de Divulgação (pesos)				
	c1 = 2	c2 = 6	c3 = 13	c4 = 22	c5 = 24
a1 = 1	3	7	14	23	25
a2 = 4	6	10	17	26	28
a3 = 6	8	12	19	28	30
a4 = 9	11	15	22	31	33
a5 = 12	14	18	25	34	36
a6 = 18	20	24	31	40	42
a7 = 21	23	27	34	43	45
a8 = 25	27	31	38	47	49

Figura 2.4 – Dados originais para os pares peças-veículos (GREEN e RAO, 1971)

Neste problema, a utilidade original de uma combinação de atributos é calculada de acordo com a expressão matricial (2.5), que representa a utilidade total da configuração, chamada Y_{10} , obtida com a soma das utilidades a_2 e c_5 .

$$Y_{10} = 28 = [0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1][1,4,6,9,12,18,21,25,2,6,13,22,24]^T \quad (2.5)$$

Para estimar os pesos originais do quadro da Figura 2.4 com os dados do quadro da Figura 2.3, utiliza-se uma expressão semelhante à (2.2) – escrita na forma matricial, e busca-se estimar os valores w_{kj} . O uso de algoritmos de solução baseados no método dos mínimos quadrados, assim como o algoritmo MONANOVA (*Monotonic Analysis of Variance*), utilizado por Green e Rao (1971) sobre os dados do quadro da Figura 2.3, pode reconstruir, relativamente, os dados originais do quadro da Figura 2.4. A medição do efeito conjunto dos atributos a e c proposta neste problema é conhecida como *trade-off analysis*, haja vista que os atributos são considerados aos pares. neste problema é conhecida como *trade-off analysis*, haja vista que os atributos são considerados aos pares.

Pode-se comparar a importância e a utilidade dos pesos originais e dos pesos estimados das peças promocionais e dos veículos de comunicação com a abordagem apresentada (dados do quadro da Figura 2.4). Esta comparação é mostrada no quadro da Figura 2.5 e, como pode ser visto, os pesos estimados estão muito próximos dos pesos originais.

Atributos	Importância		Níveis dos Atributos	Utilidade	
	original	estimada		original	estimada
Peça Promocional	52,2%	51,6%	a1	-0,46	-0,47
			a2	-0,33	-0,34
			a3	-0,25	-0,24
			a4	-0,12	-0,12
			a5	0,00	0,02
			a6	0,25	0,25
			a7	0,37	0,37
			a8	0,54	0,53
Veículo de Divulgação	47,8%	48,4%	c1	-0,52	-0,52
			c2	-0,34	-0,34
			c3	-0,02	-0,02
			c4	0,39	0,39
			c5	0,48	0,48

Figura 2.5 – Comparativo de importância e utilidade dos valores originais e estimados

O segundo problema proposto por Green e Rao (1971) para ilustrar a proposta da medição conjunta expande as possibilidades ao adotar perfis completos para o produto (*full profile*). Este problema é representado por três atributos ao invés de dois do primeiro problema, e ilustra, como mencionado, a adoção do chamado perfil completo do produto (*full profile*). Procura-se, neste problema, obter a estrutura de preferências de uma dona de casa para cartões de desconto cujos atributos: percentual de desconto, número de lojas associadas, e custo inicial do cartão variam em vários níveis. Para proceder a análise, é necessário o ordenamento de cada opção sugerida de cartão de desconto de acordo com o critério de melhor escolha pelo recurso empregado. Os quadros das Figuras 2.6 e 2.7 mostram, como no exemplo anterior, os pesos originais (indisponíveis, obviamente) e o ordenamento das opções pelas donas de casa (para ilustração, construído utilizando os dados originais).

Desconto	Custo do Cartão								
	5 Lojas			10 Lojas			15 Lojas		
	\$7	\$14	\$21	\$7	\$14	\$21	\$7	\$14	\$21
5%	9,5	5	1	18	12	3,5	29,5	24	12
10%	18	12	3,5	27	21,5	8	34,5	31,5	21,5
20%	24	18	6,5	31,5	27	14	36	34,5	27
30%	15	9,5	2	24	18	6,5	33	29,5	18

Figura 2.6 – Dados ordenados para os modelos de cartão (GREEN e RAO, 1971)

Desconto	Custo do Cartão								
	5 Lojas			10 Lojas			15 Lojas		
	\$7	\$14	\$21	\$7	\$14	\$21	\$7	\$14	\$21
5%	34	29	19	40	35	25	50	45	35
10%	40	35	25	46	41	31	56	51	41
20%	45	40	30	51	46	36	61	56	46
30%	39	34	24	45	40	30	55	50	40

Figura 2.7 – Dados originais de utilidade para os modelos de cartões (GREEN e RAO, 1971)

A partir dos dados ordenados pelas donas de casa, mostrados no quadro da Figura 2.6, e utilizando o mesmo procedimento de estimação de parâmetros utilizado no Problema 1, pode-se calcular tanto a importância de cada atributo dos cartões de desconto, como a utilidade dos diversos níveis pesquisados. As importâncias dos atributos e as utilidades dos níveis são compiladas no quadro da Figura 2.8.

Atributo	Importância	Níveis dos Atributos	Utilidade
Percentual de Desconto	26,56%	5%	-0,50
		10%	0,11
		20%	0,5
		30%	-0,11
Número de Lojas	39,64%	5	-0,47
		10	-0,05
		15	0,53
Custo do Cartão	33,80%	\$7	0,44
		\$14	0,12
		\$21	-0,56

Figura 2.8 – Estrutura de preferências das donas de casa

2.4 ABORDAGENS HÍBRIDAS

As opções de Análise Conjunta tradicional foram ilustradas na solução dos problemas propostos por Green e Rao (1971) na seção anterior. Porém, as chamadas análises *trade-off* (dois atributos por vez) e *full profile* (perfis completos dos produtos), respectivamente, necessitam, como visto nestes exemplos, de um número grande de avaliações de configurações de produtos pelos consumidores para estimar a importância dos seus atributos e suas utilidades parciais. Para contornar esta desvantagem, pode-se utilizar as abordagens híbridas que utilizam tanto informações provenientes de abordagens compositivas como informações provenientes de uma Análise Conjunta simplificada. A grande vantagem das abordagens híbridas é o número menor de avaliações relativas de alternativas de produtos apresentados aos consumidores para ordenamento. A Análise Conjunta Híbrida e a Análise Conjunta Adaptativa são exemplos da aplicação combinada das abordagens composicional e decomposicional e são apresentadas nas próximas seções.

2.4.1 Análise Conjunta Híbrida

A Análise Conjunta Híbrida foi proposta por Green *et al.* (1981) e utiliza informações provenientes das abordagens composicional e decomposicional. Os autores enumeram uma série de passos para a aplicação da Análise Conjunta Híbrida, são eles:

- Obtenção das informações para a composição da estrutura de preferências dos consumidores;
- Apresentação aos consumidores de um conjunto limitado (usualmente oito ou nove) de alternativas completas de produtos (*full profile*), que são ordenados pelos consumidores (Y_h);
- Agrupamento dos respondentes de acordo com as similaridades de suas funções utilidade levantadas de forma composicional (*clustering*); e
- Estimação dos parâmetros do modelo híbrido, que é definido a seguir, expressão (2.6), utilizando a hipótese aditiva. Na expressão que segue, u_{kj} são as componentes de utilidade obtidas com a abordagem composicional, a é o coeficiente linear e b é o parâmetro da regressão que representa a contribuição das u_{kj} para Y_i .

$$Y_i = a + b \sum_k \sum_j u_{kj} X_{kji} + \sum_k \sum_j w_{kj} X_{kji} + e_i \quad (2.6)$$

Neste modelo híbrido, são estimados os valores de a , b e w_{kj} . A expressão (2.6) pode ser escrita, também, na forma matricial, como mostra a expressão (2.7).

$$\{Y\} = a + [X](b\{u\} + \{w\}) + \{e\} \quad (2.7)$$

A principal vantagem deste método é combinar a velocidade da medição composicional das utilidades com o grande poder e generalidade dos métodos decompositivos (GREEN *et al.*, 1981).

2.4.2 Análise Conjunta Adaptativa

A Análise Conjunta Adaptativa (ACA) se caracteriza pela adoção de computadores tanto para coletar como para analisar os dados de preferências dos consumidores. A ACA inicia com uma tarefa composicional bastante simplificada para identificação dos atributos mais importantes para o consumidor. Em seguida uma série de pares de configurações de produtos são utilizados para levantar as preferências dos consumidores e refinar suas utilidades parciais (GREEN e SRINIVASAN, 1990).

Tessarolo (2004) resume nos seguintes passos uma Análise Conjunta Adaptativa:

- Estabelecer, para os consumidores, um ordenamento dos níveis dos atributos baseados na sua utilidade;
- Para cada atributo, os respondentes avaliam a importância da diferença entre os níveis extremos (de acordo com o ordenamento do primeiro passo);
- Estabelecer para todos os níveis dos atributos uma escala de pesos, partindo de 1 para o nível melhor avaliado, 2 para o seguinte, 3 para o próximo, e assim por diante até o nível pior avaliado do atributo. Em seguida fazer a inversão destes pesos (o pior avaliado deve receber o peso 1 e o melhor avaliado deve receber o maior peso). Normalizar os pesos dados aos níveis dos atributos. Multiplicar os pesos dos níveis pelos pesos dados aos atributos;
- Com as utilidades dos níveis dos atributos, pode-se calcular a utilidade total das diversas configurações possíveis dos produtos, vide expressão matricial (2.8). Esta expressão representa o cálculo da utilidade total de uma dada configuração de produto a partir das utilidades parciais de dois atributos (o atributo 1 pode variar em 3 níveis e o atributo 2 pode variar em 2 níveis, neste exemplo $w_{11}=1$, $w_{12}=0$, $w_{13}=-1$, $w_{21}=2$ e $w_{22}=-2$);

$$\begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \\ -1 \\ -2 \\ -3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} w_{11} \\ w_{12} \\ w_{13} \\ w_{21} \\ w_{22} \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

- Na ACA utiliza-se a utilidade calculada das diversas configurações do produto para refinar o modelo, comparando os produtos pior avaliados pelos consumidores e, também, aqueles com avaliações semelhantes (inicialmente utilizando as preferências compositivas). Por exemplo, a comparação entre o produto definido pelos atributos w_{13} e w_{21} (configuração x) e o produto definido pelos atributos w_{11} e w_{22} (configuração y) pode ser escrito na forma da expressão (2.9);

$$Y_x - Y_y = (w_{13} + w_{21}) - (w_{11} + w_{22}) = -1 \quad (2.9)$$

- Cada nova comparação adiciona uma nova linha na relação matricial entre as utilidades dos atributos e das configurações dos produtos. Por exemplo à expressão (2.8) pode ser adicionada a expressão (2.9), resultando na expressão (2.10). Com a nova matriz as utilidades dos atributos são estimadas novamente. Utilizando o método dos mínimos quadrados, os novos valores das utilidades parciais, neste caso, são: $w_{11}=1,5625$, $w_{12}=0$, $w_{13}=-1,5625$, $w_{21}=1,625$ e $w_{22}=-1,625$; e

$$\begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \\ -1 \\ -2 \\ -3 \\ -1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} w_{11} \\ w_{12} \\ w_{13} \\ w_{21} \\ w_{22} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \\ e_5 \\ e_6 \\ e_7 \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

- O processo é repetido até que as diferenças entre as utilidades avaliadas entre cada etapa fique abaixo de um valor especificado.

2.5 AS PREFERÊNCIAS NO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS

A partir de meados dos anos 1970, inúmeros artigos sobre a aplicação da Análise Conjunta ao desenvolvimento de produtos foram publicados na literatura especializada. Dentre os vários trabalhos publicados, alguns foram escolhidos e são citados a seguir para ilustrar a abrangência das aplicações envolvendo o uso desta ferramenta.

Sands e Warwick (1986) definem as características de um rádio de mesa a partir da Análise Conjunta para um segmento de mercado. Lakshmikantha *et al.* (2005) definem os atributos físicos do espelho retrovisor de um *auto-rickshaw* com esta ferramenta. Dove e Bachelder (1990) aplicam a Análise Conjunta para encontrar a importância relativa dada pelos consumidores aos serviços de *electronic banking*. Miller *et al.* (1998) avaliam a sensibilidade a preço e valor das características das chamadas de uma operadora telefônica. Yamamoto e Lambert (1994) estudam a importância da estética na avaliação dos produtos industriais auxiliados pela decomposição das preferências dos consumidores. Nagle e Holdem (2003), mostram como as características de um hotel foram definidas a partir de uma Análise Conjunta segmentada.

As aplicações da Análise Conjunta citadas no parágrafo anterior indicam que esta ferramenta pode ser utilizada para a medição das utilidades de diversos atributos dos produtos. De acordo

com os trabalhos citados, as utilidades tanto dos atributos físicos como dos atributos subjetivos podem ser medidas com esta ferramenta. O uso destas medições no desenvolvimento de novos produtos pode definir seu sucesso entre os consumidores.

Os trabalhos publicados que utilizam a Análise Conjunta para a definição das configurações 'ideais' de uma família de produtos são mais escassos quando comparados à configuração de produtos únicos. Porém pode-se citar o estudo de Page e Rosenbaum (1987) descrevendo o reprojeto de uma linha de processadores de alimentos da *Sunbeam* auxiliado por esta ferramenta. Também abordando este tema, Green e Krieger (1987) utilizam a Análise Conjunta Híbrida para configurar os produtos de uma extensão de linha de uma empresa de defensivos agrícolas.

O reprojeto de uma linha de produtos da *Sunbeam*, processadores de alimentos, foi relatado no trabalho publicado por Page e Rosenbaum (1987). Neste trabalho foi utilizada uma medição das preferências dos consumidores do tipo Análise Conjunta. Na pesquisa foram consultados mais de 500 indivíduos para a identificação das utilidades dos níveis de 12 atributos potenciais dos produtos. O custo relatado da medição foi de US\$30.000,00. A combinação dos diversos níveis permite 69.984 alternativas de configurações do produto. A Figura 2.9 ilustra o nível de detalhes de duas configurações possíveis de produtos apresentadas aos consumidores.

Segundo Page e Rosenbaum (1987), as utilidades medidas dos respondentes foram agrupadas para que fossem utilizadas na busca das melhores alternativas de configurações para lançamento. Neste processo foram identificados quatro grupos de consumidores. As informações das utilidades destes grupos foram utilizadas no desenvolvimento de alternativas de produtos. As alternativas fizeram parte de vários cenários propostos (*what-if*) que foram testados contra os produtos concorrentes para a verificar sua participação no mercado (PAGE e ROSENBAUM, 1987).

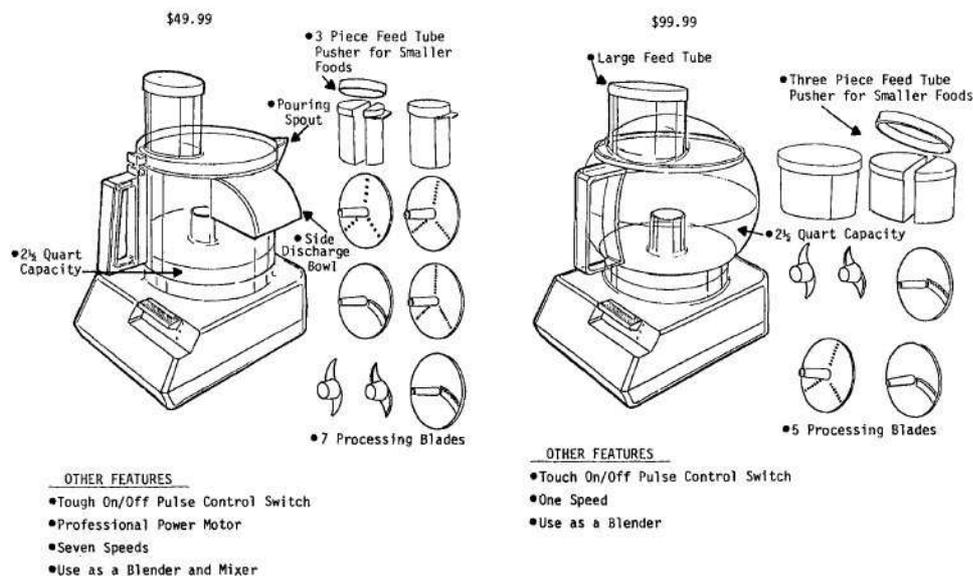


Figura 2.9 – Detalhes das alternativas de produtos apresentadas na medição das preferências dos consumidores (PAGE e ROSENBAUM, 1987)

No trabalho de Green e Krieger (1987), uma empresa (chamada *Alpha*) precisa decidir quais são os atributos de um novo produto (defensivo agrícola) que maximizam a parcela de mercado contra os produtos de dois rivais no mercado (*Beta* e *Gamma*). Para definir a configuração ideal deste produto, os autores realizam uma medição das preferências dos consumidores híbrida (parte composicional e parte decomposicional), como descrita nas seções anteriores. Na medição descrita, foram consultados 108 clientes potenciais do novo produto. No trabalho são descritos os nove atributos, e seus vários níveis, utilizados na composição de alternativas de produtos apresentadas aos respondentes. O número de alternativas possíveis de configurações de produtos de acordo com os níveis de atributos sugeridos no trabalho é de 27.648.

Para limitar a busca da melhor alternativa de extensão de linha, o trabalho sugere que o número de alternativas de configurações seja reduzido utilizando a heurística *best-in* para seleção das configurações de maior utilidade para os respondentes. A heurística *best-in* reduz o número de alternativas de configuração para avaliação ao considerar apenas as mais bem avaliadas pelos consumidores pesquisados. Desta forma, reduz-se o número de alternativas de configurações das 27.648 iniciais para ‘apenas’ 44. Estas 44 alternativas de produtos, e suas respectivas utilidades para os 108 respondentes, são utilizadas para identificar, em conjunto

com as utilidades dos produtos existentes no mercado, quais são as características das melhores alternativas de extensão de linha para a empresa *Alpha*, visando a maximização da sua participação no mercado.

2.6 ALTERNATIVAS DE CONFIGURAÇÕES DAS FAMÍLIAS

O número de alternativas de configurações dos integrantes de uma família depende do número de atributos dos produtos, e seus níveis, e da dimensão da família (número de integrantes). O número de alternativas de configurações de uma família de produtos pode ser calculado pelo número binomial, expressão (2.11). Nesta expressão o número de integrantes da família de produtos é representado por p e m representa o número de alternativas de configurações dos produtos individuais.

$$C(m, p) = \frac{m!}{(m-p)! \cdot p!} \quad (2.11)$$

Por exemplo, segundo o estudo de Page e Rosenbaum (1987), o número de integrantes da família de produtos da *Sunbeam*, nos diversos cenários avaliados em seu trabalho, varia entre 4 e 5 diferentes configurações. Ainda neste trabalho, os produtos são definidos por 12 atributos (considerando os vários níveis dos atributos, são geradas 69.984 configurações alternativas). Imaginando a escolha de 5 configurações entre as 69.984 possíveis e utilizando a expressão (2.11), chega-se ao número de 1,399E22 alternativas de configurações para a família de produtos.

A avaliação de cada uma destas alternativas para um dado objetivo (parcela de mercado, receita ou lucro) em tempo limitado é, muitas vezes, impossível. Portanto o uso de uma ferramenta de busca em populações discretas deve auxiliar o processo de escolha das melhores alternativas de configurações dos integrantes de uma família de produtos.

2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A medição das preferências dos consumidores é imprescindível para que sejam definidas com sucesso as configurações dos integrantes de uma família de produtos. As abordagens de medição das preferências dos consumidores disponíveis têm, é claro, seus pontos fortes e fracos. A abordagem composicional oferece uma alternativa rápida para a medição das preferências, porém sua precisão é mais baixa que as demais alternativas. A Análise Conjunta completa é a mais precisa das medições mas, em contra-partida, exige o ordenamento de um número muito grande de alternativas de configurações de produtos (muitas vezes inviabilizando sua aplicação). A Análise Conjunta simplificada é uma abordagem de compromisso entre a velocidade e a precisão da medição das preferências dos consumidores.

As abordagens híbridas também são alternativas de compromisso entre velocidade e precisão da medição. Por utilizarem uma base composicional na estimativa das utilidades parciais são abordagens mais conservadoras e estão menos suscetíveis a grandes desvios de medição. As alternativas de medição das preferências dos consumidores híbridas, porém, têm algumas características que podem dificultar seu emprego. A Análise Conjunta Híbrida, por exemplo, exige por parte dos entrevistados o ordenamento de um número considerável de alternativas de produtos. Na Análise Conjunta Adaptativa, devido à sua característica interativa, a pesquisa não pode ser previamente definida dificultando sua aplicação sem auxílio de computadores. Para contornar as desvantagens destas abordagens de medição, sugere-se neste trabalho uma alternativa original de medição híbrida das preferências dos consumidores que é apresentada no Anexo B.

Para definir as configurações dos integrantes de uma família de produtos, as informações das preferências dos consumidores devem ser organizadas para que seja possível investigar quais são as melhores alternativas para alcançar determinado objetivo desejado (por exemplo: as configurações que proporcionam maior satisfação dos consumidores). A investigação deste grande conjunto de alternativas na busca das melhores configurações para os produtos é um trabalho árduo que deve ser abordado de forma sistemática. Os processos de escolha evolutivos se encaixam neste perfil e trabalhos publicados por Balakrishnan e Jacob (1996) (buscando a configuração ótima de um produto utilizando Algoritmos Genéticos), Belloni *et al.* (2005) (que publicam dados comparativos entre diversas abordagens para a definição das

características de uma linha de produtos, entre elas os Algoritmos Genéticos), e Brabazon e Matthews (2003) reforçam a percepção da adequação desta abordagem para a busca das melhores configurações dos integrantes de uma família de produtos.

A proposta para a organização das informações das preferências dos consumidores, seu tratamento, e, mais importante, o detalhamento de uma abordagem computacional baseada nos Algoritmos Genéticos para definição das configurações dos integrantes de uma família de produtos são assuntos tratados no Capítulo 4 desta tese.

3 ARQUITETURAS MODULARES

Neste capítulo os conceitos da arquitetura dos produtos, com ênfase na modularidade, são revistos, bem como os métodos mais populares para modularização dos produtos. A revisão da literatura sobre modularidade e, em particular, sobre arquiteturas de enfoque modular deste capítulo foi organizada em sete seções. Por tratar-se de um assunto que permite várias interpretações, a primeira seção do capítulo apresenta uma classificação das diferentes abordagens do tema modularidade. A segunda seção deste capítulo trata da aplicação do conceito de modularidade à arquitetura dos produtos. Como a definição de uma arquitetura modular para os produtos depende de suas funções e, muitas vezes, como elas interagem, na terceira seção são apresentadas alternativas de modelagem funcional dos produtos. Na quarta e quinta seções do capítulo são apresentados os métodos mais utilizados para o processo de modularização da arquitetura de produtos. A sexta seção trata do número de alternativas de arquiteturas de enfoque modular para famílias de produtos, seguida da seção com as considerações finais sobre o assunto.

3.1 PERSPECTIVAS DA MODULARIDADE

Os produtos modulares despertam o interesse dos pesquisadores há algum tempo. Ao longo dos anos, muitos trabalhos foram publicados sobre modularidade de acordo com diversas interpretações sobre o assunto. Fixson (2003) classificou 107 trabalhos publicados que abordam a modularidade dos produtos de acordo com três perspectivas: do Sistema, do Processo de Desenvolvimento de Produtos e do Ciclo de Vida.

De acordo com esta classificação, a perspectiva de Sistema reúne os trabalhos que priorizam o enfoque modular aplicado aos modelos de produtos que descrevem os elementos e suas relações (sistema). Fixson (2003) separa os trabalhos naqueles que enfatizam os elementos do sistema e nos trabalhos que enfatizam as relações entre os elementos do sistema. A Figura 3.1 ilustra um sistema de acordo com estes dois enfoques. A Figura 3.1(a) ilustra um sistema enfatizando os elementos que o compõe, enquanto que a Figura 3.1(b) dá ênfase às relações entre os elementos. Fixson (2003) sugere três abordagens para os sistemas com ênfase em

seus elementos: paramétrica, configuracional e fundamental da modularidade, vide Figura 3.2. Na abordagem paramétrica, apenas as características individuais dos elementos podem ser alteradas. Na abordagem configuracional, os elementos não são alterados, mas sim arranjados em agrupamentos de elementos. Na abordagem fundamental, a maneira como as funcionalidades são alocadas aos componentes podem ser alteradas, resultando em produtos totalmente diferentes. Para os trabalhos que se encaixam na perspectiva de Sistema e cuja ênfase são as relações entre os elementos sua classificação depende do nível de detalhamento que as interfaces dos produtos são tratadas, podendo ser: baixo, médio e alto (FIXSON, 2003).

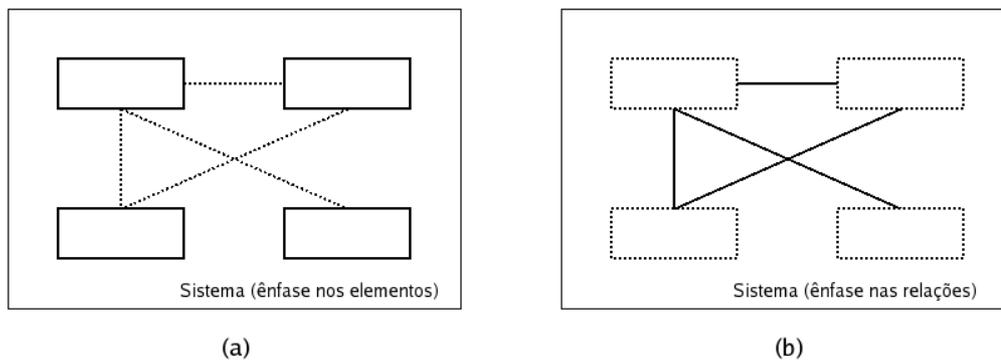


Figura 3.1 – Sistema com ênfase nos elementos (a) e nas relações (b) (FIXSON, 2003)

Na perspectiva da modularidade segundo o Processo de Desenvolvimento de Produtos proposta por Fixson (2003), os trabalhos são agrupados de acordo com sua ocorrência no processo de criação. A tendência, segundo o autor, é que dois instantes no processo sejam os mais propícios para a ocorrência da modularidade. O primeiro instante ocorre próximo do final da fase de pesquisa de mercado e está associado, majoritariamente, às atividades de *Marketing* e define a modularidade dirigida ao mercado. O segundo instante ocorre já na fase de desenvolvimento de produto e define uma modularidade motivada pela tecnologia. A modularidade dirigida ao mercado busca ofertar produtos que satisfaçam a variedade de necessidades dos consumidores. No caso da modularidade motivada pela tecnologia, buscase, durante o processo de desenvolvimento de produtos, oportunidades de modularização. Por exemplo, quando vários produtos realizam a mesma função, ela pode ser desenvolvida como um módulo (FIXSON, 2003).

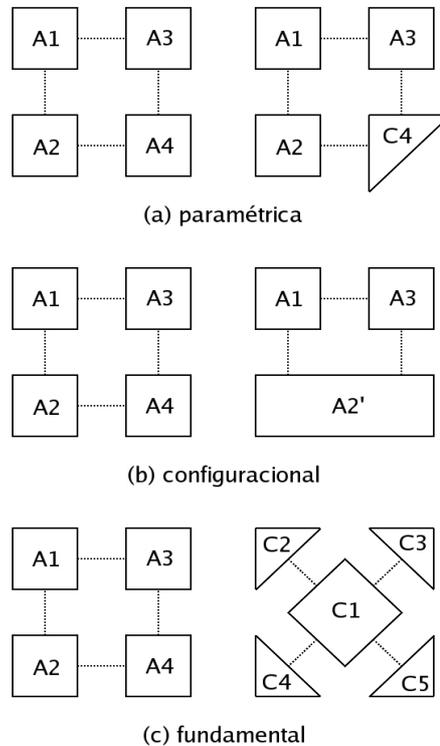


Figura 3.2 – Abordagens (a) paramétrica, (b) configuracional e (c) fundamental da modularidade (FIXSON, 2003)

Na perspectiva do Ciclo de Vida da modularidade, os trabalhos são classificados de acordo com os interesses presentes nas quatro grandes fases na vida dos produtos (desenvolvimento, fabricação, uso e descarte). Na fase de Desenvolvimento, modulariza-se o produto para que o processo de projeto e desenvolvimento seja mais eficiente. Na modularidade para Fabricação, o projeto do produto busca diminuir os custos de produção e logística e a redução do *lead-time*. A maioria dos trabalhos publicados na área da Engenharia priorizam a modularização do produto para sua fase de Uso. Dois grupos de produtos modulares se destacam nesta fase: as famílias de produtos com funções comuns desenvolvidas em módulos e o desenvolvimento de módulos para conferir características adicionais ao produto ou, então, de atualização e adaptação. Finalmente, para a fase de Descarte, busca-se na modularidade do produto a facilidade de desmontagem e o agrupamento de partes de mesmo material para o descarte seletivo (FIXSON, 2003).

3.2 ARQUITETURAS DE ENFOQUE MODULAR

Neste trabalho será adotada a definição da arquitetura dos produtos proposta por Ulrich (1995), reproduzida no Capítulo 1 deste trabalho. Segundo esta definição, os produtos classificados de acordo com sua arquitetura, podem ser, nos seus extremos, totalmente integral ou modular. No caso da arquitetura totalmente modular, define-se uma relação um-para-um entre funções e componentes. Para arquiteturas totalmente integrais, todas as funções são implementadas por um componente. Entre estes extremos, existem inúmeras arquiteturas possíveis. Nas arquiteturas com nível de integração crescente, as funções do produto são executadas de forma distribuída pelos componentes. No caso de arquiteturas de enfoque modular, os componentes executam completamente uma ou mais funções. As diferenças, segundo Ulrich (1995), entre as abordagens totalmente integral e modular no processo de desenvolvimento de produtos são mostradas no quadro da Figura 3.3. Neste quadro as duas arquiteturas são comparadas para quatro fases do processo de desenvolvimento de produtos (Conceitual, Sistema, Detalhamento, Teste).

	Conceitual	Sistema	Detalhamento	Teste
Modular	<ul style="list-style-type: none"> -Escolha dos princípios tecnológicos de funcionamento -Estabelecer as metas de desempenho -Definir variações e características desejadas -Escolha da abordagem de arquitetura 	<ul style="list-style-type: none"> -Líder de projeto 'peso-pesado' para arquitetura do sistema -Mapeamento função-componente -Definição de interfaces e protocolos -Divisão do esforço entre especialistas 	<ul style="list-style-type: none"> -Projeto dos componentes em paralelo -Monitoramento dos componentes em termos dos padrões de interface e das metas de desempenho -Projeto desempenhado por entidades 'tipo-fornecedor' -Teste independente dos componentes 	<ul style="list-style-type: none"> -Esforço na checagem de acoplamentos e interações não previstas -Mudanças de desempenho restritas a poucos componentes
Integral		<ul style="list-style-type: none"> -Líder de projeto 'peso-pesado' para integração do sistema -Ênfase nas metas globais de desempenho do sistema -Divisão do produto em poucos subsistemas integrados -Distribuição dos subsistemas para times multidisciplinares 	<ul style="list-style-type: none"> -Interação constante para avaliar o desempenho e gerenciamento das implicações nas alterações de projeto -Os projetistas dos componentes estão todos no time central -Os testes dos componentes devem ser simultâneos 	<ul style="list-style-type: none"> -Esforço focado na sintonia do sistema completo -Alterações de desempenho propagam-se por muitos componentes

Figura 3.3 – Comparativo entre as arquiteturas modular e integral (ULRICH, 1995)

No início do processo de desenvolvimento de novos produtos a definição da arquitetura está, geralmente, confinada às escolhas dos agrupamentos funcionais que serão desenvolvidos

conjuntamente como componentes. Das possíveis alternativas de mapeamento entre as funções e os componentes dos produtos, como mencionado no parágrafo anterior, duas se destacam. Uma delas é o mapeamento de todas as funções do produto em apenas um componente, arquitetura totalmente integral. A outra é o mapeamento chamado um-para-um entre as funções e componentes do produto, arquitetura totalmente modular. A Figura 3.4 exemplifica estas arquiteturas: (A) ilustra um produto que executa suas três funções com apenas um componente, arquitetura totalmente integral, e (C) ilustra um produto cujas funções são executadas por componente específicos, arquitetura totalmente modular (nos dois exemplos a questão das interfaces foi desconsiderada). Uma característica importante dos produtos, o desempenho técnico, influencia a definição por uma destas arquiteturas. As características de desempenho local podem ser maximizadas adotando uma arquitetura modular, enquanto as características de desempenho global só podem ser maximizadas com arquiteturas integrais (geralmente associadas à minimização de massa e tamanho, utilizando as estratégias de compartilhamento funcional e aninhamento geométrico) (ULRICH, 1995).

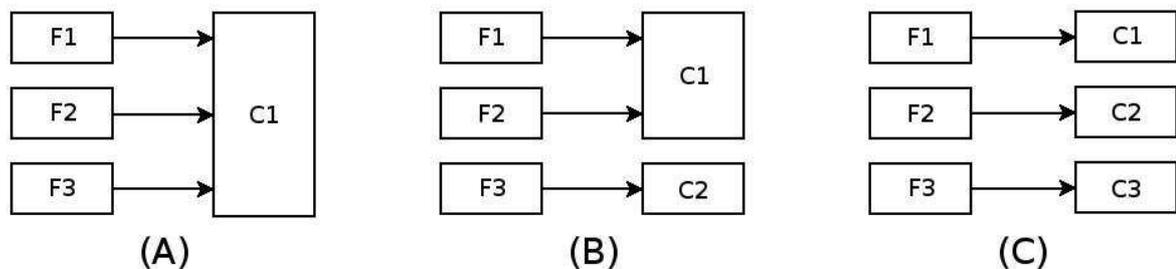


Figura 3.4 – Arquiteturas (A) totalmente integral, (B) de enfoque modular, e (C) totalmente modular dos produtos

Entre os mapeamentos que definem as arquiteturas totalmente integral e modular existem inúmeras alternativas de mapas função-componente. Estas alternativas são chamadas, neste trabalho, de arquiteturas de enfoque modular e são caracterizadas por componentes que executam completamente uma ou mais funções (as funções não são executadas de forma distribuída pelos componentes). A Figura 3.4 (B) ilustra uma alternativa de arquitetura de enfoque modular para um produto de três funções que são executadas por dois componentes – um componente executa totalmente duas funções e o segundo componente executa a outra

função. As arquiteturas completamente modular e integral podem ser vistas como casos particulares do conjunto de alternativas de arquiteturas de enfoque modular (da perspectiva do mapeamento função-componente).

Todos os produtos têm uma arquitetura intrínseca. Estas arquiteturas podem ter sido definidas racionalmente ou, então, ao acaso. Para as arquiteturas definidas ao acaso, geralmente as funções dos produtos são executadas de forma distribuída entre os componentes. Um destes casos é a arquitetura com alto grau de integração. Esta arquitetura é definida por um mapa complexo e ambíguo entre as funções e os componentes do produto. Outro caso é o das arquiteturas híbridas que são caracterizadas pelo fato de alguns componentes executarem completamente uma, ou mais, funções, enquanto outros componentes executam apenas uma parcela das funções. A Figura 3.5 ilustra estas arquiteturas: (D) é um exemplo de uma arquitetura de alto grau de integração (as três funções do produto são executadas parcialmente por cada um dos três componentes), e (E) ilustra uma arquitetura híbrida, duas funções do produto são executadas de forma distribuída entre os componentes e uma função é executada por um componente específico.

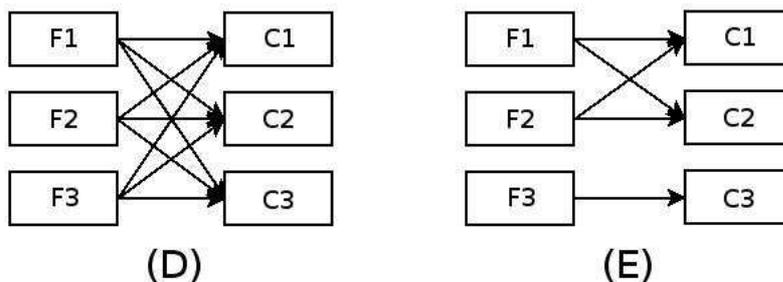


Figura 3.5 –Arquiteturas (D) com alto grau de integração e (E) híbrida

Na alocação das funções para os componentes físicos do produto, Erens e Verhulst (1997) identificam 4 alternativas. Estas possibilidades são apresentadas no quadro da Figura 3.6. Para Erens e Verhulst (1997), são recomendadas as relações entre as funções do produto e os componentes físicos que sigam as relações 1:1 ou a relação N:1. As relações 1:N e N:M são ambíguas, e as parcela das funções executadas pelos componentes do produto não são claras (dificultando, por exemplo, a alteração de uma funcionalidade do produto).

1:1	uma função é alocada para um componente físico – este é considerado um produto de arquitetura modular
1:N	uma função é alocada para vários componentes físicos - ambigüidade na execução da função
N:1	várias funções são alocadas a um componente físico – esta alocação define um produto de arquitetura integral
N:M	várias funções são alocadas para vários componentes físicos – nível de integração crescente

Figura 3.6 – Alocação das funções do produto aos componentes físicos (ERENS e VERHULST, 1997)

Erens e Verhulst (1997) listam uma série de razões para que a definição da arquitetura dos produtos seja o ponto inicial da etapa de desenvolvimento, que são reproduzidas a seguir:

- Estabilidade – interfaces entre componentes são definidas para reduzir o efeito das mudanças de um componente aos seus correlatos;
- Comunicação – a estabilidade reduz a necessidade de comunicação entre os desenvolvedores, especialmente se eles são os responsáveis pelo desenvolvimento de diferentes componentes do produto;
- Aprendizado organizacional – estabilidade é um pré-requisito para o aprendizado. As empresas são geralmente organizadas entorno de uma arquitetura de produtos;
- Comunalidade e variedade – uma arquitetura de produto pré-definida gera a possibilidade de substituir componentes por componentes com interfaces idênticas;
- Reuso e atualização – a arquitetura dos produtos é, usualmente, mais estável que seus componentes. Esta característica pode ser utilizada para a criação de novas versões do produto com a substituição de alguns componentes por versões atualizadas; e
- Controle competitivo – as empresas que controlam seus padrões de arquitetura tem vantagem sobre seus competidores. Controlando as interfaces e os componentes críticos dos produtos, as empresas estão melhor posicionadas para desenvolver produtos que maximizam as possibilidades da arquitetura.

Para Baldwin e Clark (2002) arquiteturas modulares geram opções. Em geral, segundo

Baldwin e Clark (2002), a modularização serve a 3 propósitos: a modularidade torna a complexidade gerenciável; a modularidade permite o desenvolvimento paralelo; e a modularidade tolera a incerteza (no sentido de que elementos particulares de um projeto modular podem ser alterados *a posteriore* de formas imprevistas inicialmente). Desta forma, projetos modulares oferecem alternativas que projetos interdependentes não oferecem (BALDWIN e CLARK, 2002).

A adoção de uma arquitetura modular pode trazer inúmeros benefícios aos produtos. Segundo Ulrich (1995), as arquiteturas modulares facilitam a alteração do produto durante sua vida. Isto acontece porque a alteração de uma função de um produto modular é obtida com a substituição de um componente, enquanto que a alteração de uma função de um produto totalmente integral requer a substituição de todos os seus componentes. Ainda segundo Ulrich (1995), as alterações podem ser motivadas para a evolução do produto, adição de funcionalidades, adaptação, desgaste dos componentes, consumo, e flexibilidade de uso.

De acordo com Pahl *et al.* (2005), os consumidores percebem uma série de vantagens nos produtos modulares na comparação com produtos tradicionais, entre elas: menores prazos de entrega, melhores possibilidades de substituição e consertos, melhor serviço de peças de reposição, posteriores modificações e extensões da função dentro dos limites do espectro das variantes, e possibilidades de falhas praticamente eliminadas, dado o amadurecimento do *layout*. Por outro lado, os autores citam as desvantagens, do ponto de vista do usuário, dos produtos modulares, que são: desejos especiais do usuário são difíceis de atender, determinadas características de qualidade podem ser mais desfavoráveis do que para versões específicas, e em parte, devido aos maiores pesos e volumes que um produto desenvolvido especialmente para a variante da função, em certas circunstâncias, aumentam o espaço requerido e os custos de fabricação (PAHL *et al.* 2005, p.349).

A definição das relações entre os componentes e as funções desejadas dos produtos é uma etapa fundamental no desenvolvimento das arquiteturas de enfoque modular. Nos estágios iniciais do desenvolvimento de produtos, são escolhidas as funções, ou grupos de funções, que serão posteriormente desenvolvidos em módulos. Esta escolha geralmente considera, além das funções, suas relações. Logo, para definir a arquitetura de enfoque modular do produto, utiliza-se freqüentemente modelos funcionais (derivados dos modelos de sistema)

para descrever as interfaces e as funções do produto. Devido à importância dos modelos funcionais no processo de modularização da arquitetura dos produtos, a próxima seção apresenta alguns importantes modelos de sistema (e por extensão de produto) disponíveis na literatura.

3.3 MODELOS PARA OS PRODUTOS

O uso de descrições e modelos de produtos podem auxiliar no processo de definição da arquitetura dos produtos. Segundo Erens e Verhulst (1997), existem três espaços para a descrição dos produtos: gerenciamento do produto (domínio funcional); desenvolvimento (domínio tecnológico); e manufatura (domínio físico). Os modelos dos produtos nestes três domínios podem ser definidos, segundo Erens e Verhulst (1997), da forma que segue.

- O modelo funcional é a descrição coerente das funcionalidades dos produtos. Está fortemente ligado aos objetivos primários dos produtos. O modelo é derivado das especificações oriundas do setor de Gerenciamento do Produto;
- O modelo técnico (ou tecnológico) é a descrição coerente da aplicação de tecnologias (princípios de solução) para assegurar a operação, mas não necessariamente a fabricação, dos produtos. O setor de Desenvolvimento cria grande parte da informação estruturada neste modelo; e
- O modelo físico é a descrição coerente da implementação física de um sistema. Está fortemente ligado à construção do produto. A Manufatura estabelece as condições da implementação para garantir a fácil montagem, sem comprometimento de custo e qualidade.

Nos estágios iniciais do processo de desenvolvimento, os modelos funcionais dos produtos são, geralmente, derivados dos modelos de sistema. Um modelo de produto bastante difundido na Engenharia é a Estrutura de Funções. Neste modelo, a representação funcional do produto é composta de caixas de ação e dos fluxos de entrada e saída de energia, sinal e material (PAHL *et al.*, 2005). A Figura 3.7 ilustra a Estrutura de Funções. Este modelo funcional é criado a partir da função global desejada, que é sistematicamente desdobrada até que todas as funções do produto estejam representadas.

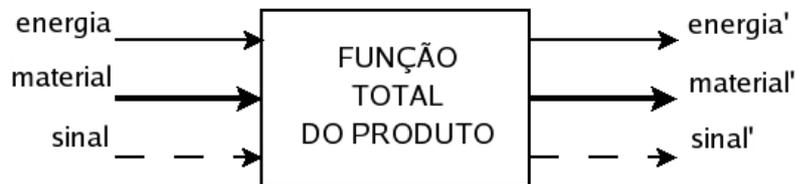


Figura 3.7 – Estrutura de Funções do produto (PAHL *et al.*, 2005)

Além da Estrutura de Funções, ilustrada na Figura 3.7, Hölttä-Otto (2005) cita como alternativas de modelagem dos produtos: a estruturação hierárquica, a descrição do produto através da *Design Structure Matrix*, DSM, a alternativa para modelagem de sistemas chamada IDEF0, os diagramas objeto-processo, ODP, e os diagramas UML (*Unified Modelling Language*).

A estruturação hierárquica é bastante comum e, provavelmente, a forma mais simples para modelar os produtos. Nas estruturas hierárquicas, os sistemas são decompostos em subsistemas e, assim por diante, até o nível desejado de detalhamento. Este modelo pode ser utilizado tanto para a representação do produto por seus componentes como por suas funções. A Figura 3.8 ilustra a estruturação hierárquica de um sistema.

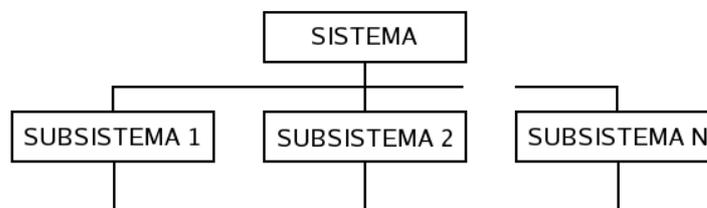


Figura 3.8 – Estruturação hierárquica de um sistema (HÖLTTÄ-OTTO, 2005)

IDEFO é uma técnica de análise funcional estruturada, de especial interesse para a manufatura (COLQUHOUN *et al.*, 1993). Como na Estrutura de Funções, no IDEF0 as funções também são representadas por caixas de ação e seus fluxos de entradas e saídas (alternativamente as

funções podem ser substituídas por componentes). Porém, neste modelo, as entradas e saídas não são decompostas como na Estrutura de Funções. São previstas duas entradas adicionais, uma entrada de controle e uma entrada chamada mecanismo, representando a ferramenta ou recurso para realizar a função (HÖLTTÄ-OTTO, 2005). A ilustração do modelo pode ser vista na Figura 3.9.

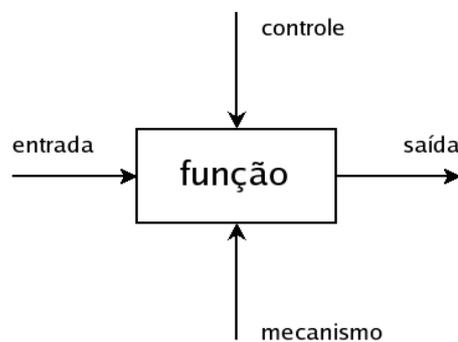


Figura 3.9 – Modelo de sistema IDEF0 (HÖLTTÄ-OTTO, 2005)

Devido à sua generalidade como modelo de sistemas, o *Design Structure Matrix* (DSM) pode ser utilizada na representação de produtos. No DSM, os elementos do sistema (funções ou componentes) são representadas nas linhas e colunas da matriz e as relações entre estes elementos definem o corpo da matriz. A Figura 3.10 ilustra um DSM com oito elementos. As relações entre os oito elementos do modelo ilustrado são caracterizadas pelo preenchimento não nulo no corpo da matriz.

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	+	0	1	0	1	0	0	0
2	0	+	1	0	1	0	0	1
3	1	1	+	1	0	0	0	0
4	0	0	1	+	0	1	0	0
5	1	1	0	0	+	0	0	1
6	0	0	0	1	0	+	0	0
7	0	0	0	0	0	0	+	1
8	0	1	0	0	1	0	1	+

Figura 3.10 – Exemplo de uma *Design Structure Matrix*

O *Object-Process Methodology* (OPM) descreve, no mesmo modelo, tanto as funções e suas interrelações como os componentes e suas interrelações. Os objetos são representados por retângulos e os processos (funções) por elipses. A ligação entre os objetos e as funções são representadas por símbolos representativos da interação (HÖLTTÄ-OTTO, 2005). A Figura 3.11 ilustra este modelo.

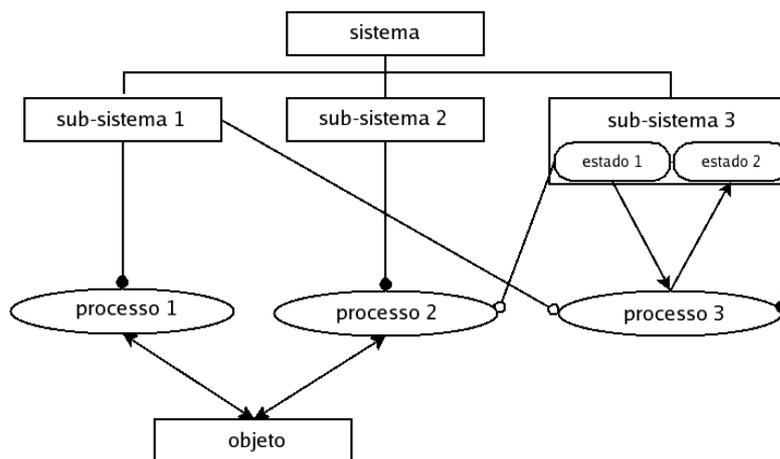


Figura 3.11 – Ilustração do *Object-Process Methodology* (HÖLTTÄ-OTTO, 2005)

A *Unified Modeling Language* (UML) é semelhante ao OPM e foi desenvolvida para o projeto de software. Na UML o conceito de classes é utilizado para representar o sistema. As classes, neste modelo, são compostas por conjuntos de atributos e operações que descrevem suas propriedades e as funções executadas. As relações entre as classes podem descrever, por exemplo, como uma classe controla a outra (HÖLTTÄ-OTTO, 2005). Um diagrama UML é ilustrado na Figura 3.12.

Hölttä-Otto (2005) complementa a apresentação destes modelos de sistema com uma tabela onde eles são comparados contra várias características consideradas relevantes pelo autor. O quadro da Figura 3.13 reproduz esta comparação.

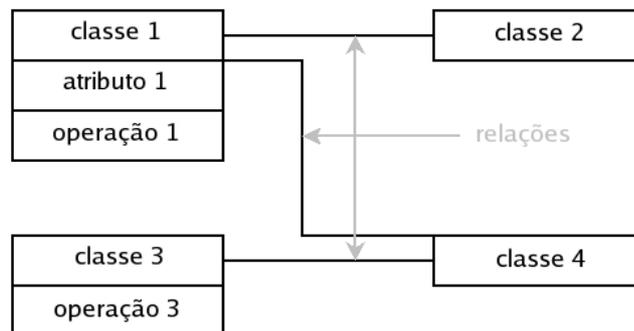


Figura 3.12 – ilustração de um modelo de sistema *Unified Modelling Language* (HÖLTTÄ-OTTO, 2005)

Finalmente, resta apresentar o diagrama de atividades do produto, que é um modelo que também pode ser elaborado nas fases iniciais de desenvolvimento dos produtos. Especialmente adequado para produtos que operam em ciclos e que interagem com o ambiente, o diagrama de atividades relaciona as várias ações do produto condicionadas às ocorrências (eventos) internas e externas. Asan *et al.* (2004) ilustram o uso deste diagrama para modelar os produtos que compõe uma família de detectores de gás domiciliar, reproduzido na Figura 3.14.

	Representação Hierárquica	Estrutura de Funções	IDEFO	DSM	OPM	UML
Funções / Componentes	F ou C	F ou C	F ou C	F ou C	F & C	F & C
Usuário		√	√		√	√
Ambiente		√	√		√	√
Tipos de interface		√		√		√
Estático / Dinâmico	E	E	E	E	D	D
Modelo de serviços e software	(√)			(√)	√	√
Usado nos estágios iniciais	(√)	√	√	√	(√)	(√)
Visualização	Níveis hierárquicos	Disposição funcional, tipos de interface	Disp. func.	Conect. interface	Obj.	Obj.
Compatibilidade		DSM (IDEFO)	(DSM)	E.F. (IDEFO)	(UML)	(OPM)

Figura 3.13 – Comparativo entre os modelos de sistema para representação dos produtos (HÖLTTÄ-OTTO, 2005)

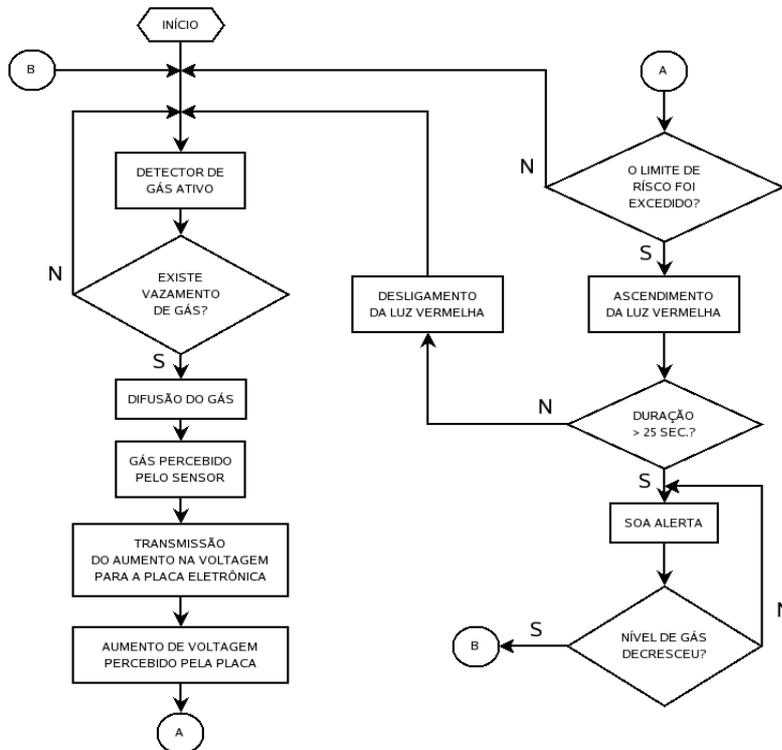


Figura 3.14 – Diagrama de atividades da família de um detector de gás domiciliar (ASAN *et al.*, 2004)

Os modelos de produtos, como mencionado, são amplamente utilizados no processo de modularização dos produtos, alguns exemplos são mostrados nas seções seguintes. Uma sugestão de tratamento modular para os produtos é apresentada na próxima seção. Esta proposta é de Pahl e Beitz (Pahl et al., 2005) e sugere que todas as funções do produto sejam desenvolvidas individualmente como módulos.

3.4 MODULARIZAÇÃO DA ARQUITETURA DE PAHL E BEITZ

Segundo Pahl *et al.* (2005, p.340), entende-se por produtos modulares as máquinas, subconjuntos e componentes específicos que satisfazem diferentes funções globais e podem ser tratados como módulos que através de combinações realizam diferentes funções. Os autores sugerem sete possíveis classificações para os módulos. Os critérios de classificação propostos e as características que os distinguem são mostrados no quadro da Figura 3.15.

Crítérios de Classificação	Características
Espécies de módulos	Módulos básicos Módulos auxiliares Módulos especiais Módulos de adaptação Não-módulos
Importância dos módulos	Módulos obrigatórios Módulos possíveis
Complexidade dos módulos	Módulos grandes Módulos pequenos
Combinação dos módulos	Somente módulos iguais Somente módulos diferentes Módulos e não-módulos
Grau de subdivisão dos elementos modulares e do sistema modular	Número de componentes por módulo Número de módulos e suas possibilidades de combinação
Grau de concretização do sistema modular	Disponível apenas como bloco de dados subdividido Diferentes concretizações das peças isoladas Totalmente concretizado
Delimitações do sistema modular	Sistema fechado com um programa de construção Sistema aberto com o plano do modelo de construção

Figura 3.15 – Classificação dos módulos (PAHL *et al.*, 2005 p.343)

A relação entre função e módulo, de acordo com a proposta de Pahl *et al.* (2005), é direta. Os produtos podem, segundo esta proposta, ser descritos por suas funções básicas, auxiliares, especiais, de adaptação e ‘customizadas’. Cada uma destas funções é desenvolvida em módulos básicos, auxiliares, especiais, de adaptação e em componentes não modulares – caso das funções ‘customizadas’. A Figura 3.16 ilustra a relação função-módulo de um sistema modular e de um sistema misto na mesma figura. O sistema modular é composto apenas por módulos enquanto que o sistema misto é composto de módulos e de não-módulos.

O procedimento proposto por Pahl e Beitz (Pahl *et al.*, 2005) para o desenvolvimento de produtos modulares segue a seqüência de atividades usual de projeto. Os autores recomendam os seguintes passos: esclarecimento do problema, construção da Estrutura de Funções, busca dos princípios de funcionamento, seleção e avaliação, elaboração do projeto global, e detalhamento e organização para a produção.

Na etapa de construção da Estrutura de Funções, as funções globais devem ser divididas em básicas e, quando necessário, auxiliares, especiais e de adaptação (para funções raramente exigidas admite-se o uso de funções ‘customizadas’). A alternativa de agrupamento funcional é mencionada pelos autores como uma alternativa econômica de solução (PAHL *et al.*, 2005 p.343-347).

Segundo Pahl e Beitz (Pahl *et al.* (2005)) todas as funções identificadas devem ser desenvolvidas em módulos (os autores prevêm o agrupamento funcional, porém não é mencionado como ele deve ser feito). Maribondo (2000) utiliza a classificação proposta pelos autores para o desenvolvimento de um método para o projeto de produtos modulares. Mazetto (2000) e Carrafa (2002) aplicam o procedimento proposto por Maribondo (2000) para o projeto de maquinário agrícola modularizado.

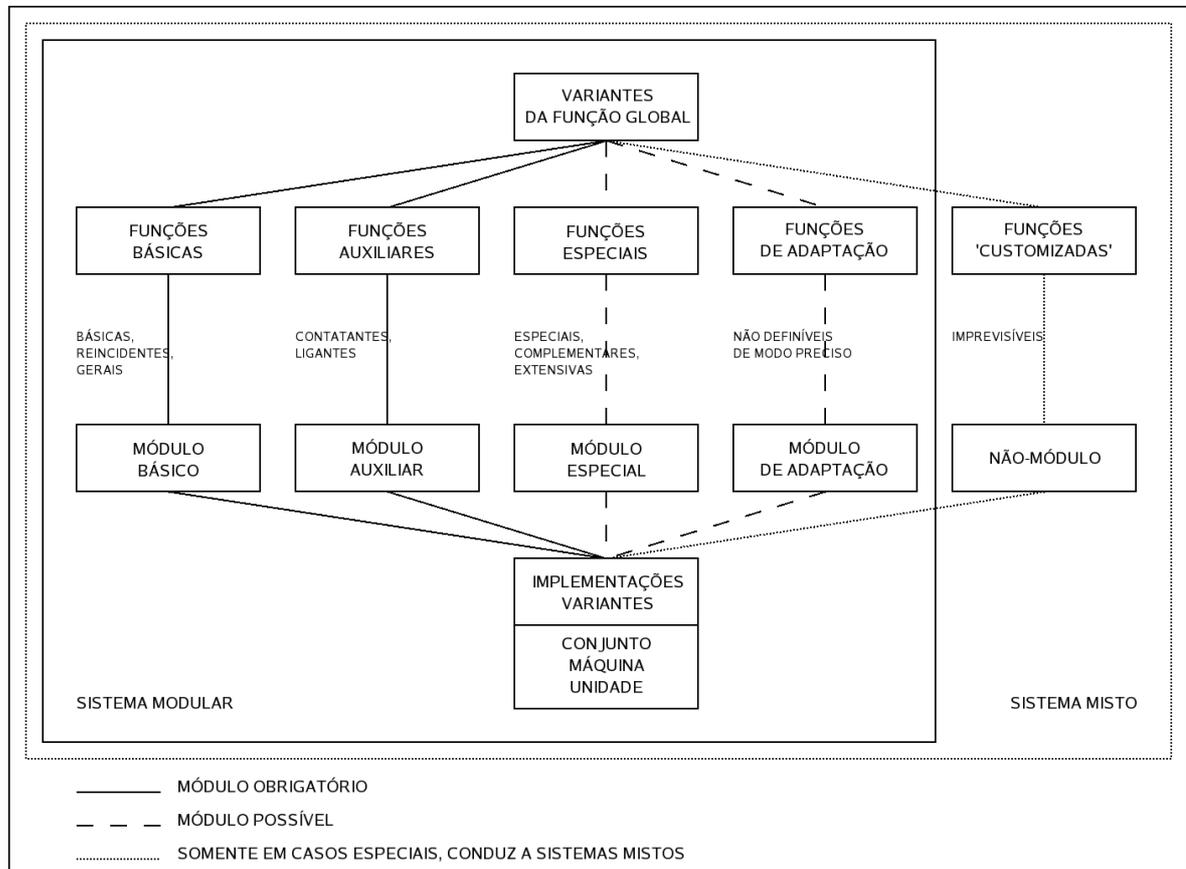


Figura 3.16 – Sistemas modulares e mistos (PAHL *et al.* 2005 p.341)

A proposta de Pahl *et al.* (2005) não é um método de modularização da arquitetura, mas uma tentativa de classificação dos tipos de funções e módulos. Na próxima seção são explorados os principais métodos de modularização da arquitetura disponíveis na literatura que sugerem os agrupamentos funcionais que devem ser desenvolvidos conjuntamente.

3.5 MÉTODOS DE MODULARIZAÇÃO

A definição dos módulos de um produto geralmente se dá pelo agrupamento funcional, ou seja, a escolha de um conjunto de funções que serão desenvolvidos em conjunto e que interagirão com o restante do produto através de interfaces padronizadas. Segundo Dahmus *et al.* (2001) módulos são subsistemas vistos como uma unidade e responsáveis pela execução

de funções identificáveis.

De acordo com Yang *et al.* (2004) e Hölttä-Otto (2005), três métodos de modularização se destacam nas publicações acadêmicas. O primeiro deles, proposto por Stone *et al.* (1998), é baseado na Estrutura de Funções do produto e na aplicação de três heurísticas propostas pelos autores (vistas mais adiante). O segundo método de modularização, chamado *Design Structure Matrix* (DSM), utiliza a representação do produto de mesmo nome para o agrupamento dos elementos e busca reduzir as interações entre os módulos formados. O terceiro método para modularização que se destaca é chamado de *Modular Function Deployment* (DFM). Este método proposto por Erixon (1996) relaciona as funções do produto com uma série de diretrizes da modularização. Os módulos do produto são definidos após o preenchimento da *Modular Indication Matrix* (MIM). O quadro da Figura 3.17 relaciona os três métodos de modularização às abordagens adotadas e aos seus méritos, segundo Yang *et al.* (2004).

Método	Abordagem e Méritos
Heurísticas de Stone <i>et al.</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Partição baseada em heurísticas e funções • Os agrupamentos são decididos pelos projetistas
<i>Design Structure Matrix</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Subsistemas e relações de interface colocados numa forma matricial • Fácil visualização dos módulos • Aplicável a vários domínios • O resultado da aplicação do método sugere os agrupamentos
<i>Modular Function Deployment</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Identificação dos agrupamentos guiada pelos motivadores da modularização • Ferramenta de uso similar ao QFD • Os projetistas colaboram com visões estratégicas na decisão dos agrupamentos

Figura 3.17 – Três métodos tradicionais de modularização (YANG *et al.*, 2004)

Nas próximas subseções estes três métodos são apresentados com mais detalhes e, em seguida, mostra-se o resultado de pesquisas bibliográficas sobre outros métodos utilizados no processo de modularização de produtos.

3.5.1 Métodos das Heurísticas de Stone *et al.* (1998)

O método que segue foi proposto por Stone *et al.* (1998) para a identificação, ainda no domínio funcional, dos possíveis módulos de um produto. As regras desenvolvidas empiricamente, também chamadas de heurísticas, estão baseadas nas dependências funcionais que o produto apresenta. Portanto, é fundamental que, para aplicar estas regras, a Estrutura Funcional do produto esteja disponível. Admitindo que as funções do produto e suas interações são conhecidas, pode-se aplicar as seguintes heurísticas:

- Fluxo dominante: o conjunto de sub-funções percorridos por um fluxo (energia, sinal ou matéria), desde sua entrada, ou iniciação, no sistema até a saída do sistema ou até o momento de sua conversão no sistema define um módulo, Figura 3.18;

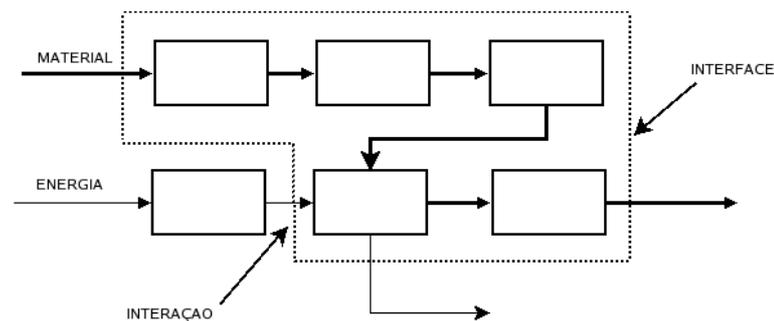


Figura 3.18 – Exemplo de aplicação da heurística de fluxo dominante (STONE *et al.*, 1998)

- Ramificação do fluxo: cadeias de funções paralelas associadas a um fluxo ramificado constituem um módulo; as interfaces destes módulos com o restante do produto ocorrem nos pontos de ramificação, Figura 3.19; e
- Conversão-transmissão: uma sub-função de conversão de fluxo ou um par conversão-transmissão (ou conjunto associado de sub-funções) constituem um módulo, Figura 3.20.

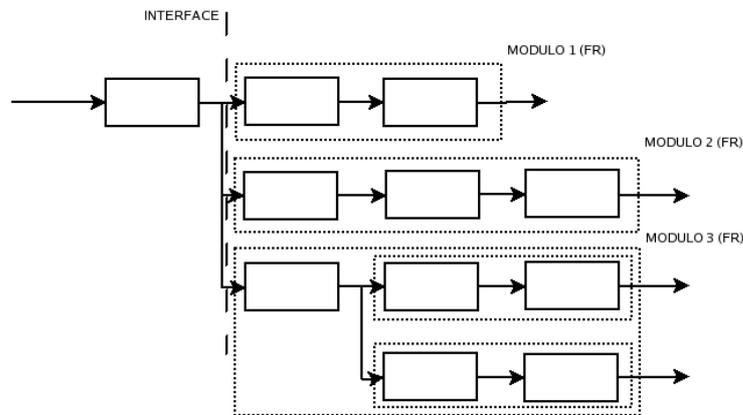


Figura 3.19 – Exemplo de aplicação da heurística da ramificação do fluxo (STONE *et al.*, 1998)

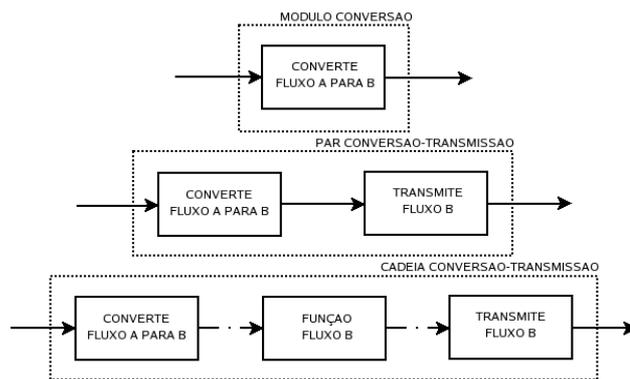


Figura 3.20 – Aplicação da heurística da conversão-transmissão (STONE *et al.*, 1998)

Estendendo o trabalho publicado por Stone *et al.* (1998), Dahmus *et al.* (2001) propõem uma abordagem para auxiliar a definição de quais são, ou poderiam ser, os módulos comuns, ou compartilhados, de uma família de produtos. A proposta dos autores utiliza as três heurísticas descritas e adiciona uma nova definição funcional. Esta definição funcional divide as funções dos produtos em duas categorias: funções únicas e funções compartilhadas.

As funções compartilhadas definirão os módulos comuns da família. Os grupos funcionais que compartilham ou apresentam fluxos e funções similares e que estão presentes em vários produtos, segundo os autores, devem ser agrupados em um único módulo. As funções únicas, por outro lado, que servem apenas um produto ou subconjunto de produtos também deveriam ser agrupadas em um módulo. O processo de definição da arquitetura da família de produtos de Dahmus *et al.* (2001) é composto de sete passos chamados de Método da Matriz de

Modularidade. Esta seqüência de atividades pode ser conferida na Figura 3.21.

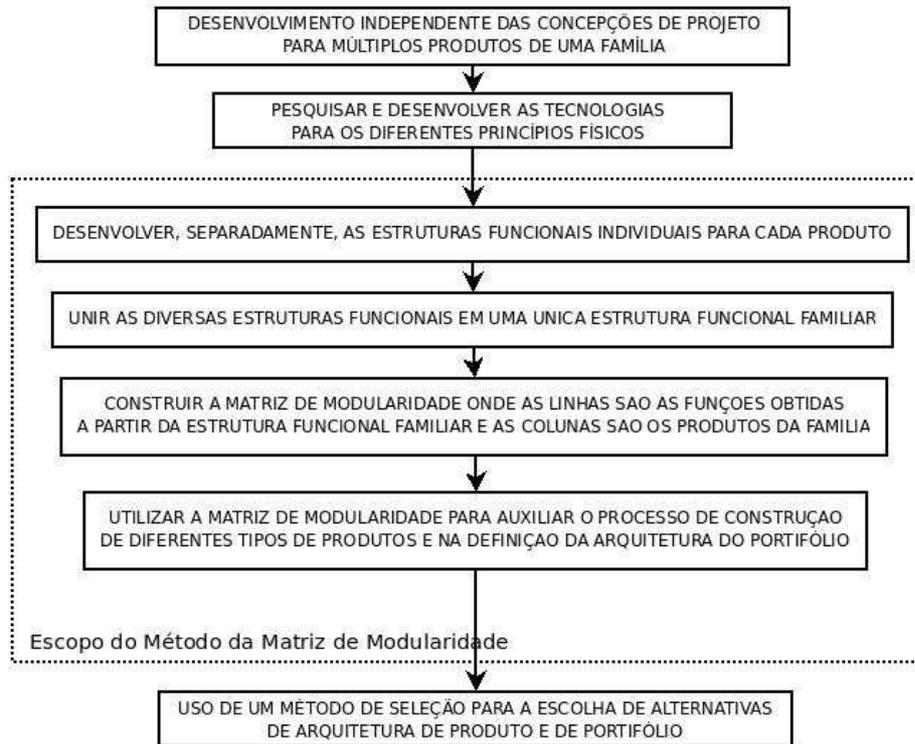


Figura 3.21 – Passos associados ao Método da Matriz de Modularidade (DAHMUS *et al.*, 2001)

3.5.2 *Design Structure Matrix (DSM)*

O uso do modelo DSM de sistema, apresentado anteriormente, pode ser estendido para a definição dos agrupamentos funcionais que serão desenvolvidos, posteriormente, como módulos. Na *Design Structure Matrix* os termos fora da diagonal principal são indicativos de dependência entre os elementos. Na chamada *Architecture DSM*, utilizada para representar arquiteturas, as funções ou componentes são os elementos dos sistema. Na definição da arquitetura do sistema, geralmente o principal objetivo é agrupar as funções de forma a minimizar o número de interações inter grupos (de funções) e maximizar as interações intra grupos (de funções) (BROWNING, 2001).

Browning (2001) cita o uso de Algoritmos Genéticos e de penalizações de distância para a obtenção de alternativas de agrupamentos dos elementos do sistema. Porém, a simples transformação banda de uma matriz onde estão representadas as interações entre os elementos pode resultar em alternativas de ‘modularização’ do produto. A Figura 3.22(a) ilustra a representação das interações de um produto composto por oito elementos (funções, componentes, etc.) na DSM. A transformação banda desta matriz reordena os elementos de maneira que os termos da matriz concentrem-se em torno da diagonal principal. A Figura 3.22(b) ilustra a transformação banda da matriz das interações representada na Figura 3.22(a). Nas figuras ilustradas os números à esquerda e acima das matrizes identificam os elementos do sistema representado.

A transformação banda executada sugere que sejam formados grupos de elementos. Três grupos de elementos, módulos, foram identificados neste processo. O primeiro grupo, M1, é formado pelos elementos 6 e 4 do sistema. O segundo grupo, M2, é composto dos elementos 3, 1, 2, 5 e 8. O terceiro e último grupo, M3, é formado apenas pelo elemento 7. Os agrupamentos, ou módulos, são frisados por retângulos na Figura 3.22(b). Ainda nesta figura, as interações entre os módulos são representadas por circunferências. Para o caso ilustrado foram identificadas uma interação entre os módulos 1 e 2, e uma interação entre os módulo 2 e 3.

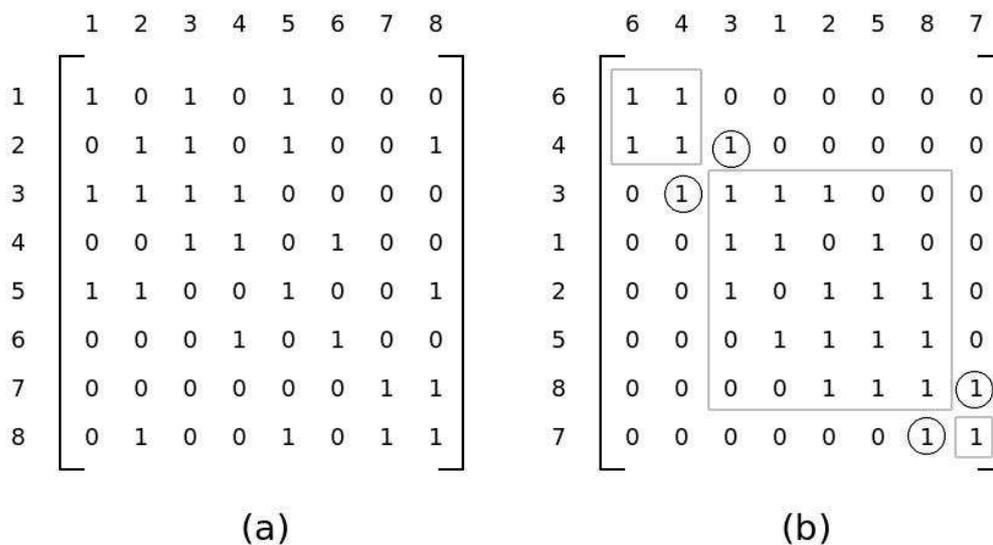


Figura 3.22 - Modularização de um sistema através da diagonalização matricial

Entre outros, Huang e Kusiak (1998) desenvolveram um método de modularização baseado na DSM. Na proposta de Huang e Kusiak (1998), um algoritmo de modularização é aplicado sobre duas matrizes. A primeira delas, chamada de matriz de interação, é semelhante a matriz apresentada na Figura 3.22(a). O modelo de sistema utilizado na proposta prevê graus diferentes de interação entre os elementos e o sentido da interação também é considerado (resultando em matrizes não simétricas). A segunda matriz utilizada na proposta de modularização representa a adequação de dois elementos para formação de um módulo. Na Figura 3.23 estas duas matrizes são ilustradas lado a lado. Os números de preenchimento do corpo da matriz da esquerda indicam o grau da interação entre os elementos. A letra ‘a’ utilizada na matriz da direita representa a adequação dos dois elementos na formação de um módulo. A letra ‘u’, ao contrário, representa a não adequação destes elementos para formação de um módulo.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	+		1									+					u						
2		+						5				+											
3	1		+	1	5	2			2	2		a	+										
4			1	+											+	u							
5			5		+					5						+						a	
6			1			+						a					+					u	
7			5				+											+					
8							5	+		5						a			+				
9			1						+												+		u
10			1							+												+	u
11					5		5				+												+

Figura 3.23 – Representação das matrizes de interação e adequação (HUANG e KUSIAK, 1998)

Após a aplicação do algoritmo de modularização descrito pelos autores, as matrizes de interação e adequação mostradas na Figura 3.23 são transformadas. O resultado da transformação é ilustrado na Figura 3.24. Nesta figura, estão representados os dois agrupamentos de elementos sugeridos pelo procedimento. O primeiro agrupamento reúne os elementos 11, 5 e 3. O segundo agrupamento é composto dos elementos 7, 2 e 8.

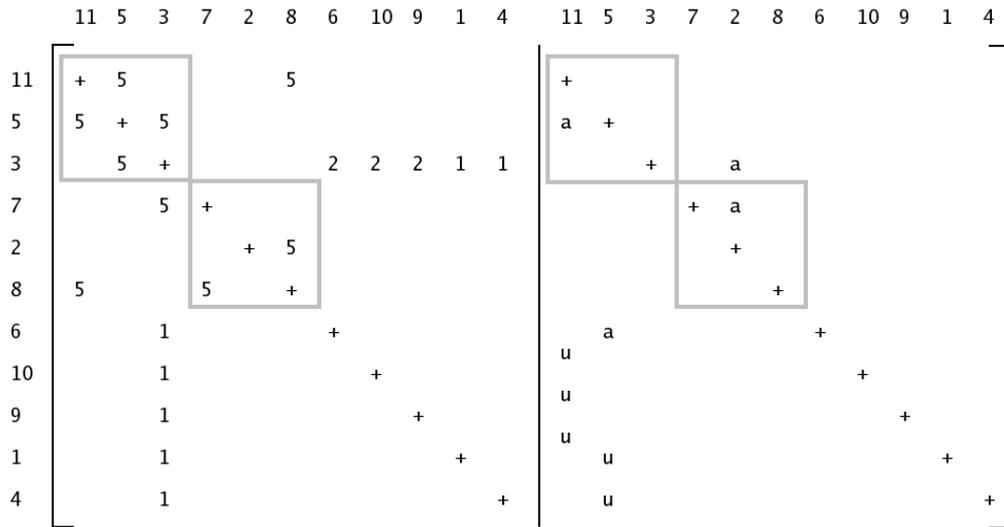


Figura 3.24 – Resultado do algoritmo de modularização (HUANG e KUSIAK, 1998)

3.5.3 *Modular Function Deployment (MFD)*

O método de estruturação dos produtos proposto por Erixon (1996), *Modular Function Deployment - MFD*, utiliza o conceito de *module drivers*. Os *module drivers* são os motivos para a modularização ao longo do ciclo de vida dos produtos. O autor identifica doze *modular drivers* em seu trabalho, nomeados: multi-aplicativo (*carry-over*), evolução tecnológica, alteração de projeto, especificação técnica, estilo, unidade comum, processo e organização, testes em separado, compra de produtos prontos, manutenção e manutenibilidade, atualização, e reciclagem (ERIXON, 1996).

O método MFD descrito por Erixon é baseado nos doze *module drivers* mencionados e sua aplicação é definida nos cinco passos seguintes:

- Aclaramento das especificações do projeto do produto utilizando a matriz do QFD, com a modularidade como o primeiro requisito de projeto;
- Análise das funções e seleção dos princípios técnicos de solução;
- Identificação dos possíveis módulos utilizando a MIM (*Modular Indication Matrix*);

- Avaliar os conceitos testando as interfaces entre os módulos; e
- Melhora dos módulos utilizando os conhecidos métodos DFX (*Design for X*) e a MIM como indicador do que é importante em cada módulo.

O quadro da Figura 3.25 resume as características dos *module drivers*. Nesta tabela, os *module drivers* são classificados em seis grupos: desenvolvimento de produtos, variação, fabricação, qualidade, aquisição e após estar no mercado.

No método proposto, destaca-se uma ferramenta utilizada para a identificação dos possíveis módulos – MIM. Esta ferramenta relaciona os *module drivers* aos portadores de efeito das funções identificadas dos produtos (podendo ser utilizada para relacionar os *module drivers* às funções dos produtos segundo exemplo de Rozenfeld *et al.* (2005)). O preenchimento da MIM é semelhante ao preenchimento das conhecidas matrizes do QFD. Erixon (1996) sugere em seu trabalho a determinação de três níveis de importância para cada par *module driver*-componente.

O escolha dos componentes (funções) que serão desenvolvidas em módulos distintos é baseada na pontuação obtida por cada um deles na MIM, os componentes (funções) que obtiverem maiores pontuações são os candidatos potenciais. Alternativamente, grupos de componentes (funções) que apresentam forte ligação com algum *module driver* devem ser consideradas para o agrupamento em um módulo (ERIXON, 1996).

A Figura 3.26 ilustra a anatomia e um exemplo de preenchimento da MIM para um produto que executa cinco funções. Na ilustração de aplicação da MIM, são destacadas duas funções com potencial para serem desenvolvidas em módulos, função 3 e função 4. Ainda de acordo com a ilustração, as funções 1, 2 e 3 poderiam ser agrupadas e desenvolvidas em um módulo, haja vista que as três têm relação com uma diretriz de modularização comum.

Desenvolvimento de Produtos	<i>Multi-aplicativo (carry-over)</i>	Uma função pode ser um módulo separado onde a solução tecnológica atual poderá ser levada para uma nova geração ou família de máquinas
	<i>Evolução tecnológica</i>	Uma função pode ser um módulo único se o mesmo possui uma tecnologia que irá ser superada no seu ciclo de vida
	<i>Alteração de projeto</i>	Uma função pode ser um módulo separado se esta possui características que serão alteradas segundo um plano
Variação	<i>Especificação técnica</i>	Poderão ser concentradas alterações para se conseguir variantes em um módulo
	<i>Estilo</i>	A função pode ser um módulo separado se esta é influenciada por tendências e moda de tal maneira que as formas e/ou cores tenham de ser alteradas
Fabricação	<i>Unidade comum</i>	Uma função poderá ser separada em um módulo se a mesma possuir a mesma solução física em todos os produtos variantes
	<i>Processo e organização</i>	Razões para separar uma função em um módulo: <ul style="list-style-type: none"> • Ter uma tarefa específica em um grupo • Encaixar-se no conhecimento tecnológico da empresa • Possuir uma montagem pedagógica • Ter um tempo de montagem que difere extremamente dos outros módulos
Qualidade	<i>Testes em separado</i>	Uma função poderá ser separada em um módulo quando esta função puder ser testada separadamente
Aquisição	<i>Compra de produtos prontos</i>	Uma função que pode ser tratada como uma caixa preta causa redução dos custos logísticos
Após estar no Mercado	<i>Manutenção e manutenibilidade</i>	Manutenções e reparos podem ser facilitados se uma função fica bem em um módulo separado
	<i>Atualização</i>	Se for necessária pode ser facilitada se a função a ser atualizada for um módulo
	<i>Reciclagem</i>	Isto pode ser uma vantagem para concentrar materiais poluentes ou recicláveis em um mesmo módulo ou em módulos separados, conforme o caso

Figura 3.25 – Resumo das características dos *module drivers* (ROZENFELD *et al.*, 2005)

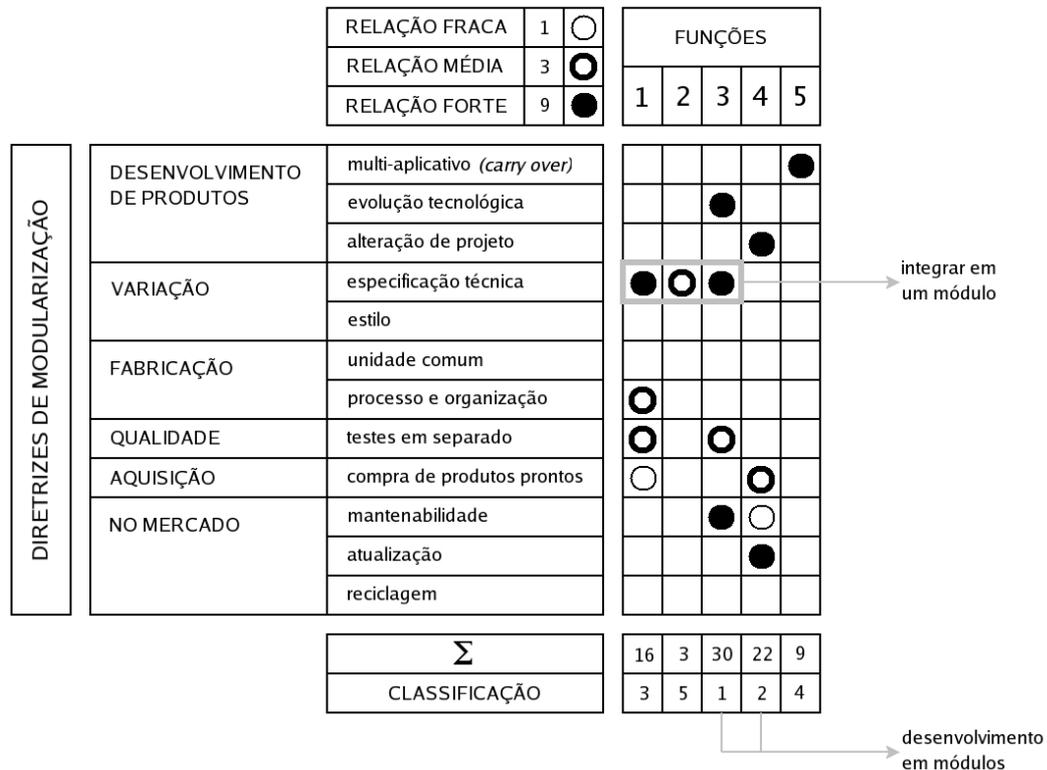


Figura 3.26 – Anatomia da *Modular Indication Matrix* (ROZENFELD *et al.*, 2005)

Este procedimento difere dos já apresentados pois reconhece que a arquitetura modular pode servir para vários propósitos. Os *module drivers* identificados por Erixon (1996) são utilizados em propostas alternativas de modularização disponíveis na literatura – a MIM, por exemplo, é utilizado por Scalice (2003) para propor um método de desenvolvimento de uma família de produtos modulares para o cultivo e beneficiamento de mexilhões.

3.5.4 Outros Métodos de Modularização

Muitos métodos de modularização, além dos apresentados, podem ser encontrados nas publicações acadêmicas. Jose e Tollenaere (2004) listam vários trabalhos com propostas de ferramentas para auxiliar a definição de arquitetura, modularização e plataforma de produtos. No trabalho revisional dos autores, as referências são classificadas em métodos (passo a passo), ferramentas matemáticas e algoritmos (para busca de alternativas ótimas). O quadro da Figura 3.27 reproduz parte deste trabalho destacando as ferramentas de definição de arquitetura e modularização.

Referências	Método	Ferramenta Matemática	Algoritmo
Agard (2002)			M
Bongulielmi <i>et al.</i> (2001)	A		
Burbidge (1982)			M
Carrie (1973)			M
Chakrabarti (2001)		M	
Chambolle (1999)	A		
Chandrasekharan e Rajagopalan (1986)			M
Dahmus <i>et al.</i> (2001)	A, M		
David e Kusiak (1998)			M
Evans (1963)		M	
Hadj-Hamou (2002)	A, M		
Hata e Kimura (2001)		M	
Huang e Kusiak (1998)	M		M
Jianxin e Tseng (1999)	M		
King e Nakornchai (1982)			M
Kusiak (1987)			M
Kusiak (1999)	A, M		A, M
Kusiak e Larson (1995)	A		
Kusiak e Wang (1995)			M
Martin e Ishii (1997)		A	
McCormick <i>et al.</i> (1972)			M
Mikkola e Gassmann (2001)		M	
Otto (2001)	M		
Otto <i>et al.</i> (2001)	M		
Thomas (1991)			M
Viriththamulla (1991)		M	M

Figura 3.27 – Trabalhos publicados para definição de arquitetura (A) e a construção modular (M) (JOSE e TOLLENAERE, 2004)

3.6 ALTERNATIVAS DE ARQUITETURAS DE ENFOQUE MODULAR

O número de alternativas de arquiteturas de enfoque modular para os produtos crescem significativamente à medida que o número de funções aumenta. Para modelos funcionais

pobres, ou seja, poucas funções identificadas, pode-se pesquisar todas as alternativas de arquitetura de enfoque modular do produto, ou família de produtos, e escolher a melhor entre elas, de acordo com a função objetivo desejada. Para os produtos que executam muitas funções, a pesquisa por todo o domínio das alternativas de arquitetura de enfoque modular torna-se impossível e um método de busca sistemático deve ser empregado.

A quantidade de alternativas de arquiteturas de enfoque modular para um produto pode ser calculada pelos números de Bell (Expressão 3.1) – os números de Bell fornecem o número de partições desconexas não vazias que podem ser obtidas de um conjunto com n elementos; o n ésimo número de Bell é obtido pela soma dos números de Stirling de segunda espécie (que são calculados recursivamente)(Expressão 3.2) (DICKAU, 2006).

$$B_n = \sum_{k=0}^n S_n^{(k)} \quad (3.1)$$

$$S_n^{(k)} = \left\{ \begin{matrix} k \\ n \end{matrix} \right\} \quad (3.2)$$

Na Expressão (3.2), $S_n^{(k)}$ são os números de Stirling de segunda espécie, que podem ser obtidos recursivamente aplicando a Expressão (3.3) (DICKAU, 2006).

$$S_n^{(k)} = S_{n-1}^{(k-1)} + kS_{n-1}^{(k)} \quad (3.3)$$

Pode-se ter uma idéia do número de alternativas de arquitetura de enfoque modular calculando o número de Bell para um produto com 5 e 20 funções. Para 5 funções o número de alternativas de arquiteturas de enfoque modular para o produto é 52, já para 20 funções é $5,172E+13$, ou seja, para um produto de 20 funções é impossível (considerando a capacidade de processamento dos computadores atuais e de um lapso de tempo razoável) que todas as alternativas sejam avaliadas. A Figura 3.28 ilustra as 52 alternativas de arquiteturas de

enfoque modular geometricamente. Nesta figura, as funções identificadas estão representadas pelos vértices de um pentágono. Quando a função identificada é implementada por um componente específico, ela é representada por um ponto no diagrama. Quando várias funções são executadas por um componente, no diagrama estas funções são ligadas por segmentos de reta. A primeira representação geométrica ilustrada na Figura 3.28 corresponde a uma arquitetura totalmente modular, enquanto que a última representação corresponde a um produto totalmente integral.

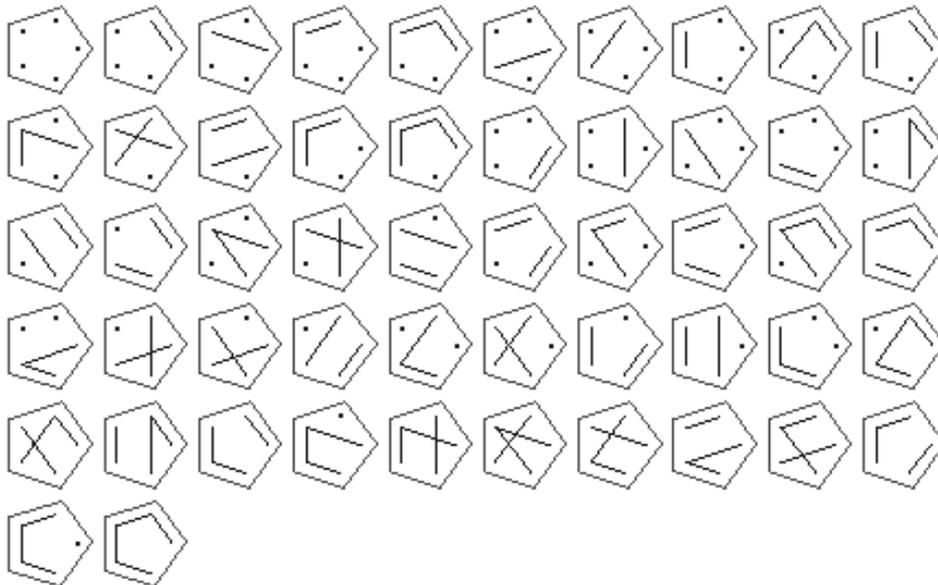


Figura 3.28 – Partições desconexas não vazias de um conjunto com 5 elementos (DICKAU, 2006)

O quadro da Figura 3.29 associa o número de funções identificadas de um produto, até vinte, com o número de alternativas de arquitetura de enfoque modular possíveis – calculadas utilizando as equações ((3.1), (3.2) e (3.3)).

Funções Identificadas	Número de Arquiteturas de Enfoque Modular Possíveis
1	1
2	2
3	5
4	15
5	52
6	203
7	877
8	4.140
9	21.147
10	115.975
11	678.570
12	4.213.597
13	27.644.437
14	1,909E+8
15	1,383E+9
16	1,048E+10
17	8,286E+10
18	6,821E+11
19	5,833E+12
20	5,172E+13

Figura 3.29 – Crescimento das alternativas de arquitetura de enfoque modular com o número de funções do produto

Pode-se ver no quadro da Figura 3.29 que a partir de 15 funções (mais de um bilhão de alternativas de arquiteturas de enfoque modular), a investigação de todo o conjunto de possibilidades demanda um grande esforço de cálculo e mesmo utilizando computadores potentes o tempo consumido nesta operação é muito grande.

3.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar da relativa facilidade de aplicação dos métodos tradicionais de modularização da arquitetura, em nenhuma das abordagens é possível saber, mesmo relativamente, quão boa é a alternativa de arquitetura sugerida. As heurísticas de Stone *et al.* (1998) podem resultar em

alternativas de modularização da arquitetura interessantes para produtos únicos nos quais seja fácil identificar os fluxos principais e ramificados de material, energia e sinal. Para produtos com Estruturas Funcionais complexas, nos quais existem mais de um fluxo entre as funções, a aplicação da heurística fica comprometida. A aplicação destas mesmas heurísticas no processo de modularização da arquitetura de famílias de produtos é ainda mais complexa pois depende da criação de uma Estrutura Funcional Familiar, além de atividades posteriores de correção dos módulos formados. A sugestão da aplicação da tradicional *DSM* para modularização da arquitetura dos produtos, *Structural DSM*, é elegante, porém após executar o algoritmo de transformação de uma matriz esparsa em matriz banda são percebidos dois problemas no uso desta ferramenta: o primeiro é que as matrizes originais representativas dos produtos são, em muitos casos, muito próximas de matrizes banda; o segundo é como definir quais são os módulos após a transformação sugerida (em muitos casos mais de uma alternativa de arquitetura pode ser adotada). Por fim, a proposta de Erixon (1996) está mais ligada à identificação dos motivadores da adoção do conceito de modularização dos produtos do que necessariamente a operacionalização deste conceito. Neste método de modularização, as interações entre os elementos funcionais são desconsideradas. As alternativas sugeridas de módulos, segundo este método, podem resultar em níveis baixos de interação entre os elementos de um mesmo módulo e, altos níveis de interação entre os diferentes módulos sugeridos.

Dentre os modelos funcionais de produtos apresentados neste capítulo, 2 se destacam: a Estrutura de Funções e o DSM. Ambos se destacam pela sua simplicidade e por fornecerem informações suficientes para a definição dos agrupamentos funcionais que serão tratados como módulos. O modelo hierárquico não fornece informações suficientes sobre as interações entre as funções e os demais modelos são muito sofisticados para serem utilizados no início do processo de desenvolvimento dos produtos. Por estas razões, na continuação deste trabalho a Estrutura de Funções será utilizada sempre que seja necessário apresentar algum raciocínio ou para ilustrar um modelo funcional de produto. Nas partes de automatização de definição de uma arquitetura de enfoque modular serão utilizadas modelos de produtos derivados da DSM.

Para escolher qual é a melhor alternativa de arquitetura de enfoque modular para uma família de produtos é necessário que se estabeleça um critério de avaliação. A abordagem adotada

para enfrentar esta questão é formular uma métrica baseada em custos que indique qual é a arquitetura de enfoque modular mais atrativa para o fabricante. Esta métrica deve estimar relativamente os custos de desenvolvimento e de preparação de interface e montagem das alternativas. Uma métrica assim definida deve auxiliar o processo de escolha de uma arquitetura de enfoque modular para uma família de produtos (ou seja, uma arquitetura de enfoque modular buscando a geração da diversidade de oferta).

Por fim, outro tópico que deve ser abordado na operacionalização de um método para definir uma arquitetura de enfoque modular para uma família de produtos é o processo de escolha. Como as alternativas de arquiteturas de enfoque modular são populações discretas, os métodos de escolha baseados em gradiente não podem ser utilizados. O uso de Algoritmos Genéticos para a procura de alternativas ótimas tem potencial para ser a solução deste problema. Kreng e Lee (2004), por exemplo, utilizam processos evolutivos em conjunto com modelos DSM e os aspectos motivadores da modularização, muitos deles descritos por Erixson (1996), no reprojeto de um aspirador. A proposta desta tese e os resultados da investigação do processo de escolha das melhores alternativas de arquitetura para uma família de produtos baseada em Algoritmos Genéticos assim como a formulação de um métrica de estimativa relativa dos custos das arquiteturas são apresentados no Capítulo 5.

4 DEFINIÇÃO DAS CONFIGURAÇÕES

Este capítulo é dedicado ao desdobramento da parcela dedicada à definição dos atributos dos integrantes de uma família de produtos do método simplificado proposto para pesquisa e desenvolvimento. Neste capítulo, em primeiro lugar, descreve-se o tratamento básico dado às informações de preferências dos consumidores. Em seguida o procedimento de busca das melhores alternativas de configurações dos produtos, adotado neste trabalho, é apresentado. A operacionalização do processo de busca bem como um estudo da importância das variáveis que influem nos resultados gerados pela aplicação do procedimento também são descritos neste capítulo. Segue-se uma série de exemplos que são utilizados para ilustrar a definição das configurações de produtos para objetivos distintos. Na quinta seção, uma ferramenta para formalizar a transformação da descrição dos produtos da perspectiva dos atributos para a descrição funcional é sugerida. Para finalizar o capítulo, são traçadas as considerações finais sobre o assunto.

4.1 TRATAMENTO DAS INFORMAÇÕES

Na proposta de pesquisa original, a definição das melhores configurações para os integrantes de uma família de produtos são obtidas a partir das informações sobre as preferências dos consumidores. Com as informações provenientes da medição das preferências dos consumidores, informações sobre os produtos dos concorrentes, conhecimento das restrições às alternativas de produtos que podem ser oferecidas ao mercado, e com a escolha de uma função objetivo (por exemplo: máxima utilidade, conquista de parcela de mercado, receita ou lucro desejados) pode-se iniciar a busca das melhores alternativas de configurações dos integrantes da família de produtos. As informações das preferências dos consumidores, na abordagem de pesquisa proposta, são consideradas disponíveis na forma mostrada no quadro da Figura 4.1. Uma alternativa para medir estas preferências de forma híbrida é mostrada em detalhes no Anexo B deste trabalho.

Atributos	Níveis	Indivíduos			
		1	2	...	N
A	A ₁	UA ₁₁	UA ₂₁	...	UA _{N1}

	A _m	UA _{1m}	UA _{2m}	...	UA _{Nm}
B	B ₁	UB ₁₁	UB ₂₁	...	UB _{N1}

	B _n	UB _{1n}	UB _{2n}	...	UB _{Nn}
...
X	X ₁	UX ₁₁	UX ₂₁	...	UX _{N1}

	X _p	UX _{1p}	UX _{2p}	...	UX _{Np}

Figura 4.1 – Representação das utilidades parciais dos atributos para um grupo de N indivíduos

No quadro da Figura 4.1, $U_{K_{ij}}$ é a utilidade do j -ésimo nível do atributo K para pelo i -ésimo indivíduo. Ainda neste quadro, A , B e X são utilizados para descrever os atributos dos produtos, N é o número de indivíduos pesquisados, e K_n é o número de níveis do atributo K .

4.1.1 Estimativa de Participação de Mercado

A previsão de participação de mercado para determinada configuração de produto pode ser calculada utilizando utilidades parciais como mostradas no quadro da Figura 4.1. Estas informações podem ser agrupadas (globalmente ou em segmentos) ou utilizadas de maneira individualizada (pesquisa de preferência de configuração indivíduo a indivíduo). No caso da busca individualizada das melhores opções de configurações de produtos, a escolha de cada indivíduo deve ser considerada para o cálculo da participação de mercado – (simulação de comportamento do mercado) (MOORE, 1980).

O cálculo da participação de mercado de uma configuração de produto de acordo com as preferências individuais pode ser obtida aplicando os passos descritos adiante – a operacionalização dos passos descritos depende das expressões (4.1) e (4.2).

- Cálculo da utilidade da configuração proposta para o produto (UT na expressão (4.1));
- Cálculo das utilidades das configurações dos produtos existentes no mercado (UT na expressão (4.1));
- Escolha do produto com a configuração de maior utilidade para o indivíduo;
- Soma do número de escolhas de uma determinada configuração entre os indivíduos pesquisados (N_p na expressão (4.2)); e
- Cálculo da estimativa da parcela de mercado da configuração, dividindo o número de escolhas que uma determinada configuração obteve entre os indivíduos pelo número de indivíduos pesquisados (P_p na expressão (4.2)).

A expressão (4.1) ilustra o cálculo das utilidades de duas configurações de produtos (matriz 2×9 , à esquerda da igualdade) para um conjunto de utilidades parciais de N indivíduos (matriz $9 \times N$, também à esquerda do sinal de igualdade).

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} UA_{11} & UA_{21} & \dots & UA_{N1} \\ UA_{12} & UA_{22} & \dots & UA_{N2} \\ UA_{13} & UA_{23} & \dots & UA_{N3} \\ UB_{11} & UB_{21} & \dots & UB_{N1} \\ UB_{12} & UB_{22} & \dots & UB_{N2} \\ UB_{13} & UB_{23} & \dots & UB_{N3} \\ UC_{11} & UC_{21} & \dots & UC_{N1} \\ UC_{12} & UC_{22} & \dots & UC_{N2} \\ UC_{13} & UC_{23} & \dots & UC_{N3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} UT_{11P1} & UT_{12P1} & \dots & UT_{1NP1} \\ UT_{11P2} & UT_{12P2} & \dots & UT_{1NP2} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Na expressão (4.1), as duas configurações ilustram produtos definidos por 3 atributos (A, B e C) todos variando em 3 níveis. Na expressão matricial, UT_{iPn} é a utilidade total da n -ésima configuração de produto de acordo com as preferências do i -ésimo consumidor (matriz $2 \times N$ no exemplo, à direita do sinal de igualdade).

Para o cálculo da participação no mercado necessita-se o ordenamento das colunas da matriz das utilidades totais dos produtos para cada indivíduo pesquisado (matriz à direita dos sinal de igualdade, no exemplo, $2 \times N$). O número de indivíduos, N_p , cuja utilidade total da

configuração avaliada é a maior entre as configurações pesquisadas é utilizado para o cálculo da participação de mercado da configuração do produto, P_p , segundo equação (4.2).

$$P_p = \frac{N_p}{N} \quad (4.2)$$

Uma alternativa para a estimativa da participação de mercado a partir da avaliação individual dos consumidores é seu uso agregado. Nesta abordagem utiliza-se utilidades parciais médias da população pesquisada e a estimativa de participação de mercado é calculada pela equação (4.3).

$$P_A = \frac{U_A}{U_A + U_B + \dots + U_X} \quad (4.3)$$

Na equação (4.3), P_A é a estimativa de participação de mercado do produto de configuração A . Ainda na equação (4.3), A , B , ... e X são as configurações presentes no mercado e U_A , U_B e U_X são as utilidades totais médias das configurações dos produtos A , B , ... e X , respectivamente.

4.1.2 Estimativa de Receita e Lucro

O uso da participação estimada de mercado, obtida a partir das preferências individuais dos consumidores, em conjunto com o preço de venda (um possível atributo do produto) e estimativas dos custos variáveis são utilizados para estimar receita e lucro de determinada configuração de produto. As equações (4.4) e (4.5) ilustram o cálculo da receita e do lucro esperados de uma determinada configuração de produto.

$$R_p = V \cdot P_p \cdot PV_p \quad (4.4)$$

Na equação (4.4), V é o tamanho, em unidades, estimado do mercado para o produto, PV_p é o preço de venda do produto, e R_p é a receita estimada para o produto. Na equação (4.5), L_p é o lucro estimado para a produto e CV_p é o custo variável estimado.

$$L_p = V \cdot P_p \cdot (PV_p - CV_p) \quad (4.5)$$

As expressões (4.2) ou (4.3), (4.4) e (4.5) podem ser utilizadas, ainda, como função objetivo do processo de escolha dos atributos de novos produtos. Com a definição da função objetivo, a procura pelas melhores alternativas de configurações de uma família de produtos pode ser iniciada. O resultado do processo de busca deverá ser o conjunto das alternativas mais adequadas de configurações para os integrantes de uma família de produtos para um determinado objetivo desejado.

4.2 OS ALGORITMOS GENÉTICOS NA DEFINIÇÃO DAS CONFIGURAÇÕES

Devido a necessidade de investigar um vasto número de alternativas de configurações para os integrantes de uma família de produtos, o auxílio de processos de busca evolutivos são adotados neste trabalho. Nesta tarefa particular empregam-se os Algoritmos Genéticos, que são abordados no Apêndice A deste trabalho. Para definir as configurações dos produtos, ou dos integrantes de uma família de produtos, utilizando Algoritmos Genéticos, o fluxograma das Figuras 4.2 e 4.3 é executado. Na Figura 4.2 são mostradas a geração e a leitura das informações necessárias para a execução dos passos tradicionais dos Algoritmos Genéticos. Na Figura 4.3 o fluxo de avaliação, cruzamentos e mutações dos cromossomos são ilustrados, assim como os direcionamentos do fluxo de ações para o problema de definição das configurações de uma família de produtos.

As informações necessárias para o início do processo de definição dos atributos dos integrantes de uma família de produtos são: as configurações dos produtos concorrentes, o número de produtos da família (dimensão da variedade), e as informações das preferências (utilidades parciais) dos consumidores. Os direcionamentos do fluxo de processamento

dependem: da escolha do tipo de análise desejada (utilidade, fatia de mercado, receita ou lucro máximos), do critério de escolha dos produtos pelos consumidores, e do método de seleção e combinação dos cromossomos.

Deve-se destacar, ainda, alguns aspectos importantes no uso dos Algoritmos Genéticos voltados para a definição das configurações dos produtos. Aspectos como a codificação dos cromossomos, o processo de seleção dos cromossomos, a formação de uma nova geração a partir da combinação dos cromossomos mais aptos, e as mutações cromossômicas são determinantes para se obter sucesso na aplicação deste processo evolutivo. Nas próximas subseções estas particularidades da implementação dos Algoritmos Genéticos são abordadas.

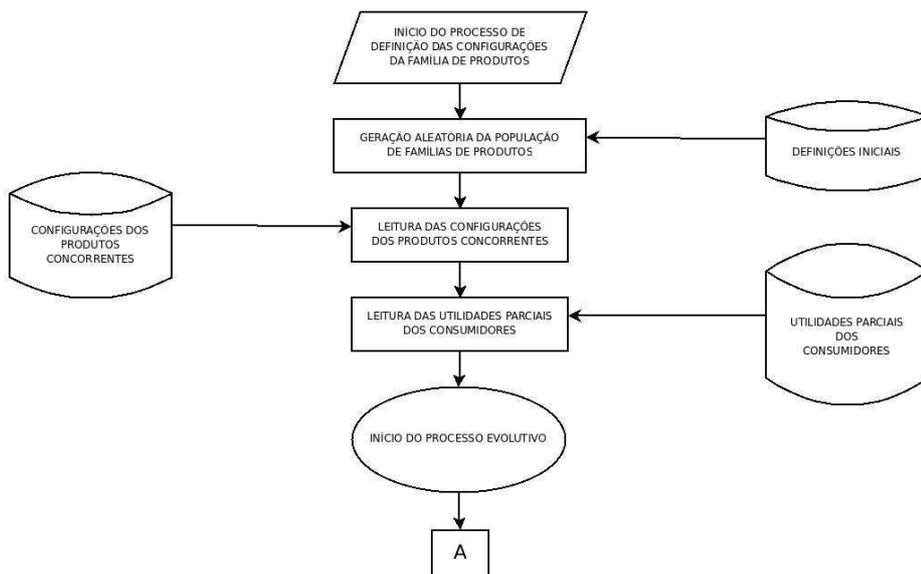


Figura 4.2 – Procedimento de busca das configurações dos integrantes de uma família de produtos (parte 1)

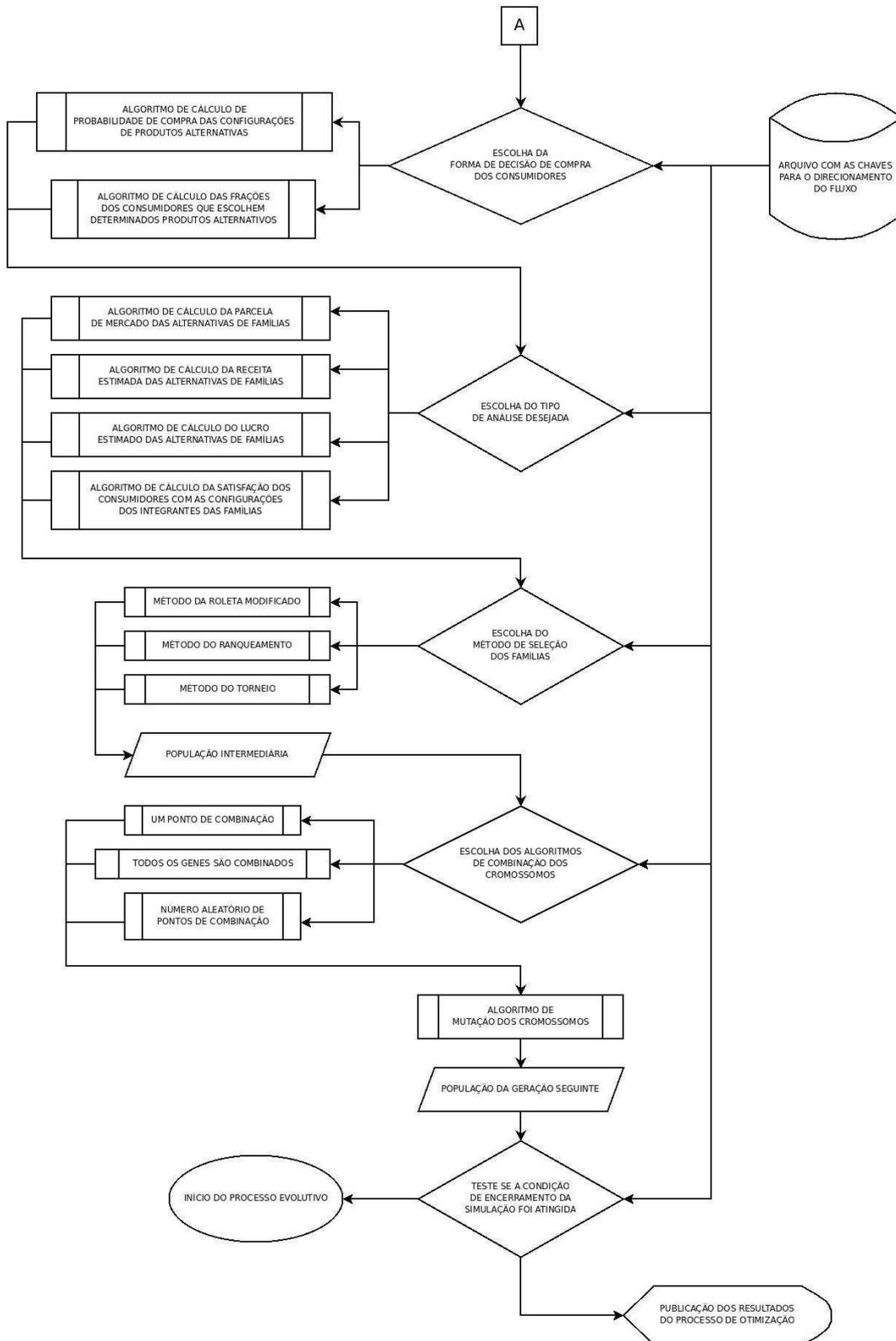


Figura 4.3 – Procedimento de busca das configurações dos integrantes de uma família de produtos (parte 2)

4.2.1 Codificação dos Cromossomos

Uma população de alternativas de configurações de famílias de produtos deve ser formada para que o processo de evolução (utilizando Algoritmos Genéticos) seja iniciada. Cada indivíduo desta população é representado por um cromossomo que carrega as informações sobre as configurações de todos os integrantes da família de produtos. Por exemplo, um cromossomo que representa um indivíduo de uma população cujos integrantes são famílias de 3 produtos deve conter as informações necessárias para que as configurações destes 3 produtos possam ser acessadas e modificadas ao longo do processo evolutivo.

Cada cromossomo da população de famílias de produtos alternativas é formado por um certo número de genes. O número de genes depende do tamanho da família de produtos e do nível de detalhamento com que os produtos são descritos (número dos atributos). No desenvolvimento dos Algoritmos Genéticos aplicados à definição da configuração dos produtos, os genes e, por extensão, os cromossomos são codificados por 0's e 1's (codificação binária). Um gene do cromossomo representa a presença de um determinado atributo em um indivíduo (produto) da família. O tamanho deste gene depende do número de níveis que podem ser assumidos pelo atributo (alelos). Um exemplo dos alelos de um gene que representa um atributo que pode assumir 3 níveis é apresentado na Figura 4.4. O primeiro alelo do gene indica que o primeiro nível do atributo está ativo (presente no produto), o segundo alelo indica a presença do segundo nível do atributo e assim por diante.

	gene (atributo)		
alelo 1 (nível 1)	1	0	0
alelo 2 (nível 2)	0	1	0
alelo 3 (nível 3)	0	0	1

Figura 4.4 – Exemplo de gene que pode assumir 3 variações (alelos)

A configuração de um produto particular pode ser descrita pelos níveis de seus atributos, ou por uma seqüência de genes. Considere como ilustração um produto descrito por 3 atributos.

Cada um destes atributos pode variar em 3 níveis. Ainda como ilustração, considere que este produto particular é configurado da seguinte maneira: segundo nível do primeiro atributo, terceiro nível do segundo atributo e primeiro nível do terceiro atributo. O produto assim configurado teria seu cromossomo codificado de forma binária como mostra a Figura 4.5. O primeiro segmento do cromossomo é um alelo do primeiro gene, o segundo segmento um alelo do segundo gene e o terceiro um alelo do terceiro gene.

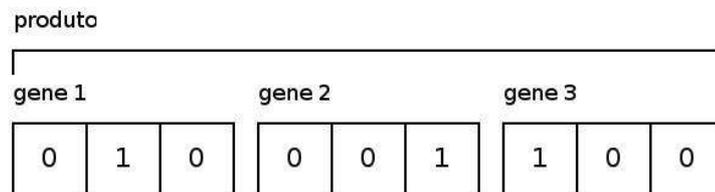


Figura 4.5 – Genes definidores da configuração do produto

O cromossomo de um indivíduo de uma população de famílias de produtos, como mencionado, depende do número de integrantes da família. Novamente, a título de ilustração da codificação do cromossomo representativo de uma família de produtos, considere uma família composta de 3 produtos, cada produto descrito por 3 atributos (genes), e cada atributo podendo assumir 3 níveis (alelos). O cromossomo representativo de uma alternativa particular de uma família de produtos com estas características é ilustrado na Figura 4.6.

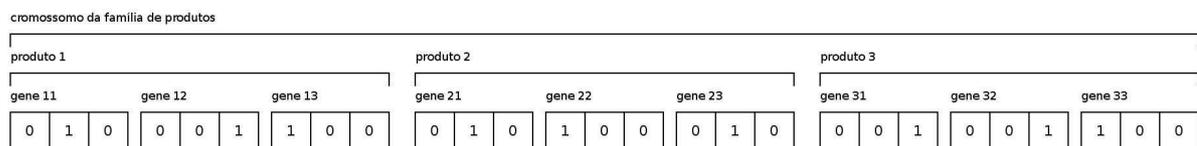


Figura 4.6 – Representação de um cromossomo definidor de uma família de 3 produtos

4.2.2 Combinação dos Cromossomos

Após a formação da população inicial e a seleção do conjunto de cromossomos mais aptos, de acordo com a função objetivo escolhida, estes cromossomos são combinados para a formação da próxima geração de uma população em evolução. A combinação é resultado da fragmentação dos cromossomos genitores em pontos específicos, seguida da combinação destes fragmentos para a formação de novos cromossomos. Os cromossomos são fragmentados respeitando-se a integridade dos genes, ou seja, nenhum gene é partido.

Usualmente, utiliza-se uma entre três possíveis alternativas de fragmentação dos cromossomos. A primeira delas é a fragmentação do cromossomo em todos os seus genes constituintes. A segunda é a fragmentação do cromossomo em apenas um ponto entre seus genes. A última é a fragmentação do cromossomo em um número aleatório de partes. Seja qual for a alternativa de fragmentação escolhida, os indivíduos da geração seguinte são formados a partir dos segmentos de cromossomos dos genitores.

Para ilustrar as alternativas ao processo de combinação cromossômica, considere, novamente, os cromossomos representativos de uma família de 3 produtos, definidas por 3 atributos, cada atributo podendo variar em 3 níveis. Considere, também, as alternativas de cromossomos genitores, C1 e C2, mostradas na Figura 4.7. Na representação destes cromossomos todos os pontos possíveis de fragmentação são representados pelos espaços entre os genes.

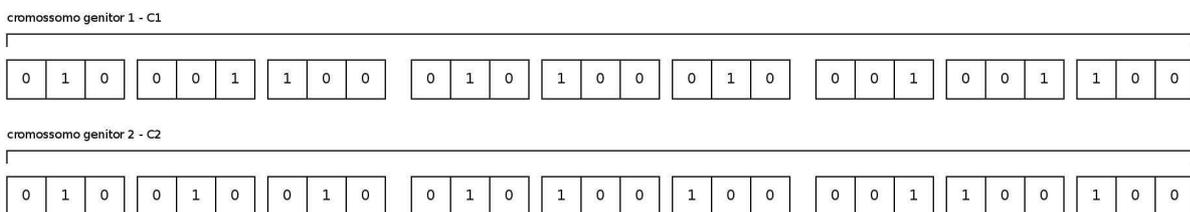


Figura 4.7 – Exemplo de cromossomos genitores de uma família de 3 produtos

A combinação cromossômica obtida a partir da fragmentação completa dos cromossomos genitores é ilustrada na Figura 4.8. Neste caso, o cromossomo gerado, C0, foi construído herdando cada um de seus genes ou do cromossomo C1 ou C2 (a definição de qual genitor um determinado gene será herdado é aleatória). No exemplo, o cromossomo gerado, composto de

9 genes, herda os genes 1, 3, 4, 6 e 9 do cromossomo genitor C1 e os demais genes do cromossomo genitor C2.

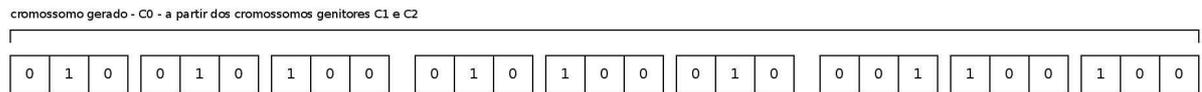


Figura 4.8 – Exemplo de combinação de genes para formação de um novo cromossomo, fragmentação completa

A combinação dos cromossomos genitores para a formação de um indivíduo da nova geração a partir da fragmentação dos cromossomos genitores em apenas um ponto depende, obviamente, da definição do ponto de fragmentação. Este ponto pode ser definido de forma aleatória e o cromossomo resultante da combinação obtido da composição das duas partes fragmentadas. Como exemplo para esta forma de combinação, considere, novamente, os cromossomos genitores C1 e C2. O ponto de fragmentação é definido, para efeito de ilustração, entre o quarto e quinto genes dos cromossomos. O cromossomo resultante do processo de combinação, C0, herda o primeiro fragmento do cromossomo genitor C1 e o segundo fragmento do cromossomo genitor C2. Este processo de combinação está ilustrado na Figura 4.9.

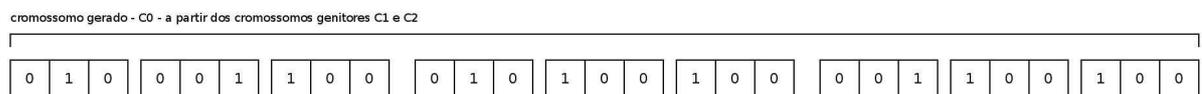


Figura 4.9 – Exemplo de combinação de genes para formação de um novo cromossomo, um ponto de combinação

A última forma de combinação dos cromossomos que representam os indivíduos de uma população de famílias de produtos é obtida a partir da fragmentação dos cromossomos genitores em um número aleatórios de posições. O número de pontos de fragmentação pode variar de 1 até o número de genes menos 1 dos cromossomos. A posição dos pontos de fragmentação são decididas aleatoriamente. O gene é formado combinando os vários fragmentos dos cromossomos genitores. A decisão de utilizar um determinado fragmento de

cromossomo de um genitor ou de outro também é aleatória. Utilizando os mesmos cromossomos genitores, C1 e C2, dos exemplos anteriores, admita uma fragmentação em três pontos. A primeira fragmentação está localizada, por exemplo, entre os genes 2 e 3, a segunda entre os genes 3 e 4, e a terceira entre os genes 7 e 8. O cromossomo gerado herda os quatro fragmentos de seus genitores. Como exemplo, um cromossomo gerado pode herdar o primeiro e quarto fragmentos do cromossomo genitor C1 e o segundo e terceiro fragmentos do genitor C2. Esta possibilidade é ilustrada na Figura 4.10.

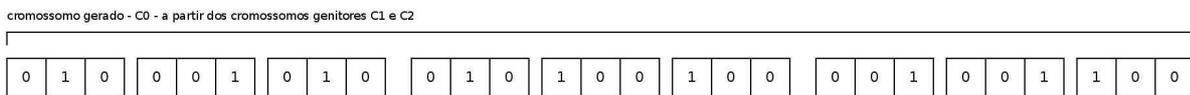


Figura 4.10 – Exemplo de combinação de genes para formação de um novo cromossomo, número aleatório de pontos de fragmentação

4.2.3 Mutação dos Cromossomos

Após a combinação dos cromossomos mais aptos, de acordo com a função objetivo escolhida, a nova geração de indivíduos está sujeita à ocorrência de alterações aleatórias nos seus cromossomos. Estas alterações são chamadas mutações e podem inserir características genéticas não presentes na população em evolução. A mutação de um indivíduo da população de alternativas de famílias de produtos envolve a alteração de um ou mais genes de seu cromossomo. O indivíduo cujo cromossomo é alterado é definido aleatoriamente. O gene que será modificado no processo de mutação tem sua localização no cromossomo definida, também, aleatoriamente. O gene alterado é substituído por um alelo, também definido de maneira aleatória (respeitando as restrições impostas de geração de indivíduos com alguma característica específica).

Para ilustrar a mutação de um cromossomo de um indivíduo de uma população de alternativas de famílias de produtos, considere a Figura 4.11. Nesta figura, o cromossomo é formado por 9 genes e, como exemplo, seu quinto gene sofrerá uma mutação. O novo cromossomo resultado do processo de mutação é incorporado à nova geração de indivíduos da população em

evolução e está ilustrado na porção inferior da Figura 4.11.

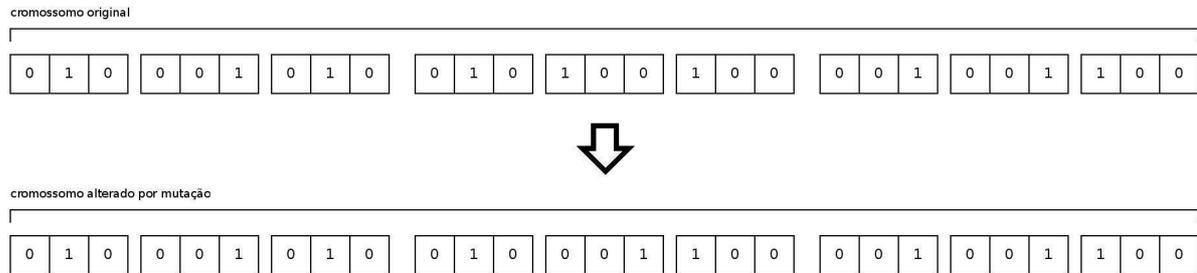


Figura 4.11 – Ilustração do processo de mutação de um cromossomo

4.3 ALTERNATIVAS DE SELEÇÃO E COMBINAÇÃO DOS CROMOSSOMOS

Esta seção identifica qual dos métodos de seleção é mais adequado para o processo de busca evolutivo dos melhores atributos para os integrantes de uma família de produtos. Nesta seção também é identificada a forma de combinação de cromossomos mais indicada (da perspectiva da eficiência do algoritmo) para a definição dos atributos dos integrantes de uma família de produtos. Os resultados obtidos da execução do Algoritmo Genético^{4.1} variando os métodos de seleção e as formas alternativas de combinação dos cromossomos são apresentados de forma comparativa.

Em todas as execuções do algoritmo foram utilizados as informações adicionais apresentadas na seqüência. Três parâmetros são utilizados para avaliação tanto do método de seleção como da forma de combinação mais indicados para o problema: resultado obtido, número de gerações até o processo estabilizar e tempo de processamento. Para verificar estes parâmetros, o algoritmo foi executado para definir as configurações de uma família de 3 produtos com o objetivo de maximizar a participação no mercado contra 10 produtos concorrentes. Todos os produtos são definidos por 6 atributos, cada um deles variando em 5 níveis. Foram

4.1 Nesta tese, os Algoritmos Genéticos foram executados a partir de um computador PC com processador AMD Athlon 64 X2 Dual Core Processor 3600+; 1 048 576 kB de memória RAM; SO: Ubuntu 8.04.1 (Hardy), Kernel 2.6.24-19 generic, interface Gnome 2.22.3; e o programa de computação matemática Scilab, versão 4.1.2.

adicionadas 2 restrições de configuração para os produtos da família que se pretende definir (estas restrições representam níveis de atributos que apenas os concorrentes podem assumir: por exemplo uma marca diferenciada). O número de produtos diferenciados que podem ser configurados é de $(5-2) \times 5 \times 5 \times 5 \times 5 \times 5 = 9.375$. O número de alternativas de famílias de produtos de 3 integrantes é $9.375! / (9.372)! \times 3! = 1,3729E11$. Calcula-se a fatia de mercado dos produtos da família utilizando os dados de utilidades parciais de 100 indivíduos (gerados aleatoriamente) – o produto de maior utilidade é escolhido. A população para evolução é de 500 indivíduos, cuja renovação a cada geração é de 90% e 10% destes indivíduos sofrem mutações (também a cada geração). Em todas as evoluções o processo foi considerado encerrado quando o cromossomo mais bem avaliado da população se mantém inalterado por 15 gerações.

4.3.1 Comparativo das Alternativas de Seleção

Para os métodos de seleção dos melhores cromossomos de uma população, foram testadas as alternativas: Roleta, *Rank* e Torneio. Nos torneios, 5 indivíduos (definidos aleatoriamente) participavam da competição. Em todos os testes para verificação do método de seleção mais indicado para o problema, utilizou-se um ponto para a combinação dos cromossomos. O algoritmo foi executado 3 vezes para cada uma das alternativas e os resultados estão compilados na Tabela 4.1, 4.2 e 4.3.

Tabela 4.1 – Comparação entre os métodos de seleção dos cromossomos – Roleta

Execução	Participação de Mercado (melhor)	Gerações	Tempo [s]	Tempo/Geração [s]
1	0,5083333	44	1.021,309	23,212
2	0,5050000	28	645,852	23,066
3	0,5000000	34	770,586	22,664
Média	0,5044444	35,33	812,582	23,000

Tabela 4.2 – Comparação entre os métodos de seleção dos cromossomos – *Rank*

Execução	Participação de Mercado (melhor)	Gerações	Tempo [s]	Tempo/Geração [s]
1	0,5050000	42	1.057,620	25,181
2	0,4966667	56	1.400,156	25,003
3	0,5050000	39	974,834	24,996
Média	0,5022222	45,67	1.144,203	25,054

Tabela 4.3 – Comparação entre os métodos de seleção dos cromossomos – Torneio

Execução	Participação de Mercado (melhor)	Gerações	Tempo [s]	Tempo/Geração [s]
1	0,5083333	33	714,475	21,651
2	0,5050000	29	634,995	21,896
3	0,5091667	38	831,445	21,880
Média	0,5075000	33,33	726,972	21,811

As configurações dos 3 produtos que resultaram em maior participação de mercado, na média, contra 10 configurações concorrentes foram obtidas utilizando o método de seleção por Torneio. Além da maior participação de mercado calculada pela média das 3 execuções do algoritmo, o método de seleção por Torneio também resultou na maior participação de mercado obtida entre as 9 execuções do algoritmo. As configurações dos produtos que produziram o percentual mais baixo de participação de mercado, geral e também da média das execuções, foram obtidas pelo método de seleção por *Rank*.

O número de gerações da população de alternativas de configurações para a família de produtos do início do processo de evolução até sua estabilização na média das execuções foi menor para o método de seleção por Torneio. O menor número de gerações entre todas as execuções foi obtido para o método de seleção da Roleta. Os piores resultados neste tópico foram obtidos utilizando o método de seleção por *Rank*. Os tempos de duração de cada otimização estão ligados ao número de gerações que dura a evolução, portanto estes números repetem o comportamento já identificado com o método de seleção por Torneio apresentando os melhores resultados. Apesar de os tempos decorridos em cada geração estarem próximos, o método de seleção por Torneio também obteve os melhores resultados neste item, indicando

maior eficiência deste método de seleção quando comparado com os métodos de seleção por Roleta ou *Rank*.

Para ilustrar o comportamento evolucionário de cada um dos métodos de seleção testados veja a Figura 4.12. Nesta figura, as evoluções das execuções que apresentaram melhores participações de mercado para a família de 3 produtos são reproduzidas para os 3 métodos de seleção. Para o método de seleção por Roleta foi utilizada a primeira execução, para o método de seleção por *Rank* foi utilizada, também, a primeira execução e para o método de seleção por Torneio foi utilizada a terceira execução.

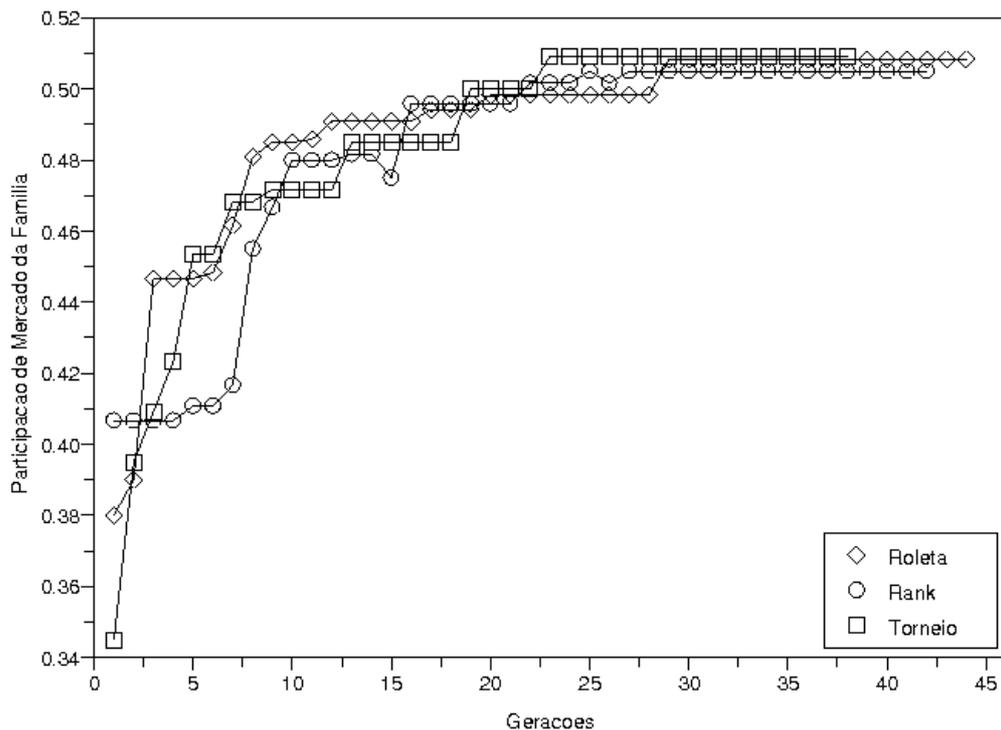


Figura 4.12 – Comportamento evolucionário – métodos de seleção

Considerando os resultados obtidos da execução do Algoritmo Genético para os 3 métodos de seleção, pode-se concluir que o método mais indicado é a seleção por Torneio. O método de seleção que se mostrou menos indicado entre os 3 testados é a seleção por *Rank*. O método de seleção por Roleta apresentou resultados intermediários, aproximando-se, em alguns aspectos,

dos resultados obtidos pelo método de seleção por Torneio o que o qualifica para ser utilizado, também, como uma alternativa para a identificação das configurações de famílias de produtos.

4.3.2 Comparativo das Alternativas de Combinação

Os cromossomos das alternativas de configurações de famílias de produtos podem ser combinados a cada geração de 3 maneiras: um ponto de combinação, múltiplos pontos de combinação ou todos os genes dos genitores podem ser combinados. As 3 alternativas de combinação dos cromossomos que representam as configurações dos integrantes de uma família de produtos foram testadas de maneira similar aos métodos de seleção. O algoritmo foi executado 3 vezes para cada uma das alternativas de combinação e o método de seleção foi mantido constante (para a comparação utilizou-se o método de seleção por Torneio, 5 participantes em cada competição). Os resultados obtidos estão reproduzidos nas Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5. A Tabela 4.3 apresenta além dos resultados da evolução úteis para o comparativo entre os métodos de seleção, resultados que são utilizados no comparativo entre as formas de combinação, nesta tabela estão as informações de combinação de cromossomos utilizando um ponto para o cruzamento.

Tabela 4.4 – Comparação entre as formas de combinação dos cromossomos – múltiplos pontos

Execução	Participação de Mercado (melhor)	Gerações	Tempo [s]	Tempo/Geração [s]
1	0,5016667	35	914,76	26,136
2	0,4983333	38	991,431	26,090
3	0,5008333	29	763,452	26,326
Média	0,5002777	34	889,881	26,173

Tabela 4.5 – Comparação entre as formas de combinação dos cromossomos – todos os genes

Execução	Participação de Mercado (melhor)	Gerações	Tempo [s]	Tempo/Geração [s]
1	0,5016667	27	646,938	23,961
2	0,5083333	40	968,272	24,207
3	0,5091667	30	710,752	23,692
Média	0,5063889	32,33	775,321	23,981

Comparando as informações das Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 pode-se ver que os melhores resultados na média das 3 execuções para as participações de mercado é obtido utilizando a combinação dos cromossomos em apenas 1 ponto. Os melhores resultados de participação de mercado absolutos foram obtidos para a combinação dos cromossomos em 1 ponto e, também, para todos os genes do cromossomo. Neste item a combinação em múltiplos pontos resultou tanto em pior participação de mercado na média das 3 execuções como na pior participação de mercado entre todas as execuções do algoritmo. O número de gerações decorridos desde o início da evolução até a estabilização do processo de otimização foi praticamente idêntico para todas as formas de combinação (33, 34 e 32). Nota-se, porém, que o tempo transcorrido por geração é sensivelmente maior para a combinação dos cromossomos em múltiplos pontos quando comparada com apenas um ponto de combinação. Portanto, seja da perspectiva da participação de mercado, seja da perspectiva do tempo transcorrido em cada processo evolutivo, a combinação dos cromossomos em apenas 1 ponto mostrou-se superior, forte superioridade sobre a combinação dos cromossomos em múltiplos pontos e leve sobre a alternativa de combinação dos cromossomos em todos os genes.

Na Figura 4.13 são ilustrados os comportamentos evolucionários para cada uma das formas de combinação tratadas nesta seção. Neste gráfico são mostrados: a terceira execução do algoritmo para a combinação dos cromossomos em 1 ponto, a primeira execução do algoritmo para a combinação dos cromossomos em múltiplos pontos e a segunda execução do algoritmo para a combinação dos cromossomos em todos os genes.

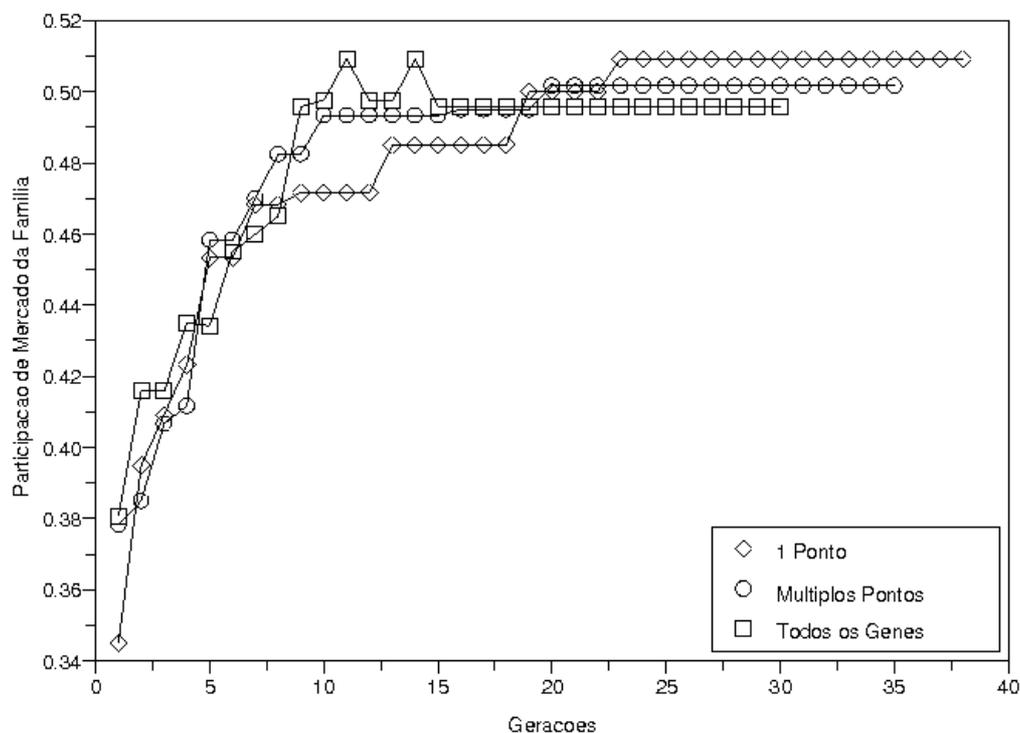


Figura 4.13 – Comportamento evolucionário – formas de combinação

4.4 DEFINIÇÃO DAS CONFIGURAÇÕES DE UMA FAMÍLIA DE PRODUTOS

A definição das configurações dos integrantes de uma família de produtos utilizando informações das preferências dos consumidores depende do objetivo que se deseja alcançar com estes produtos. Os objetivos mais comuns ao se disponibilizar um conjunto de produtos aos consumidores estão ligados à maior satisfação dos consumidores ou, então, à satisfação de objetivos dos fabricantes. Ao se definir a configuração dos integrantes de uma família de produtos buscando a satisfação máxima dos consumidores deve-se buscar o grupo de produtos que resultem na maior utilidade possível para os consumidores. Por outro lado, os objetivos dos fabricantes estão, geralmente, ligados à busca das configurações para os produtos que resultem em maior participação no mercado, maior receita e maior lucro, por exemplo. Para se definir a configuração dos integrantes de uma família de produtos de acordo com estes objetivos deve-se conhecer, além das preferências dos consumidores, os concorrentes

presentes no mercado e estimativas dos custos variáveis para os atributos dos produtos. A configuração dos integrantes de uma família de produtos utilizando os dados de preferências dos consumidores e aplicando o procedimento de otimização via Algoritmos Genéticos para cada um destes objetivos é ilustrada nesta seção.

O problema proposto para ilustrar a aplicação dos Algoritmos Genéticos na definição das melhores configurações dos integrantes de uma família utiliza os atributos de produtos automobilísticos proposto por Bauer *et al.* (1996). No trabalho de Bauer *et al.* (1996), originalmente, busca-se encontrar a configuração de um produto para que o lucro do fabricante seja máximo. O mercado, hipotético, é disputado pelo fabricante, que deseja definir a configuração de seus produtos, e dois outros concorrentes. No exemplo desta seção, a empresa A (que deseja definir as configurações dos seus produtos, sem nenhum produto neste segmento no mercado) pretende lançar três automóveis para concorrer com os produtos das empresas B (dois automóveis) e C (três automóveis) num mercado estimado em 100.000 unidades.

Para ilustrar as análises alternativas de configurações dos integrantes de uma família de produtos automobilísticos são apresentadas os atributos e níveis de produtos deste segmento, os custos variáveis estimados dos atributos e, também, as configurações de produtos concorrentes presentes no mercado. Em seguida, mostra-se como foram gerados os dados de preferências de consumidores virtuais. Finalmente, os resultados obtidos da aplicação do procedimento de busca das configurações dos integrantes de uma família de produtos para os quatro objetivos listados baseado nos Algoritmos Genéticos são apresentados. As primeiras configurações de produtos são obtidas para maximizar a utilidade do conjunto de produtos para os consumidores virtuais. O segundo, terceiro e quarto grupo de configurações são obtidos para maximizar a participação no mercado, a receita e o lucro do fabricante.

4.4.1 Atributos e Custos dos Produtos e as Configurações Concorrentes

Neste problema, os automóveis são descritos pelos atributos: marca, potência, acabamento, pintura, sistema de freios e preço (em unidades monetárias). Todos os atributos, exceção ao sistema de freios, são descritos em três níveis – o sistema de freios é descrito em dois níveis.

Os atributos e seus níveis como foram propostos originalmente por Bauer *et al.*, 1996 são apresentados no quadro da Figura 4.14. O número de alternativas individuais de produtos que podem ser configurados com estes atributos, e seus níveis, é 486. Para uma marca específica de automóvel, o número de diferentes configurações que podem ser obtidas é $1 \times 3 \times 3 \times 3 \times 2 \times 3 = 162$. Já o número de possíveis alternativas de famílias de produtos composta por três integrantes de configurações diferentes para uma determinada marca é $162! / ((162-3)! \times 3!)$, ou seja 695.520 alternativas.

Atributos dos Carros	Níveis
Marca	A, B, C
Potência	90, 110, 130
Acabamento	Tecido, veludo, couro
Pintura	Sólida, metálica, perolizada
Sistema de freios	Sem ABS, com ABS
Preço	\$37.000, \$40.000, \$43.000

Figura 4.14 – Atributos dos automóveis e seus níveis (BAUER *et al.*, 1996)

Além do quadro da Figura 4.14, o quadro da Figura 4.15, também apresentada por Bauer *et al.* 1996, lista os custos variáveis de cada um dos níveis dos atributos para configuração dos automóveis.

Atributos	Custo Variável dos Alternativas
Potência	90 = \$2.300, 110 = \$2.800, 130 = \$3.500
Acabamento	tecido = \$500, veludo = \$900, couro = \$1.500
Pintura	sólida = \$300, metálica = \$500, perolizada = \$1.000
Sistema de freios	sem ABS = \$900, com ABS = \$1.800

Figura 4.15 - Custos variáveis dos dos atributos (BAUER *et al.*, 1996)

Finalmente, o quadro da Figura 4.16 lista as configurações dos produtos concorrentes já no mercado. Nesta tabela, a marca B disputa o mercado com duas configurações de automóveis e a marca C disputa o mercado com três configurações.

Marca	Demais Atributos	Cf
B	potência:90, acabamento:veludo, pintura:perolizada, freios:s/ABS, preço:\$40.000	1
	potência:130, acabamento:couro, pintura:metálica, freios:c/ABS, preço:\$43.000	2
C	potência:110, acabamento:couro, pintura:metálica, freios:s/ABS, preço:\$43.000	1
	potência:90, acabamento:couro, pintura:sólida, freios:s/ABS, preço:\$40.000	2
	potência:130, acabamento:tecido, pintura:sólida, freios:c/ABS, preço:\$43.000	3

Figura 4.16 – Produtos concorrentes presentes no mercado

4.4.2 Dados de Preferências dos Consumidores Virtuais

As utilidades parciais dos seis atributos do problema proposto foram geradas para 100 consumidores virtuais. No cálculo das utilidades parciais, utilizou-se um procedimento que simula o ordenamento de alternativas de produtos de uma Análise Conjunta simplificada. O quadro da Figura 4.17 apresenta as importâncias e utilidades dos atributos e seus níveis para um consumidor virtual particular, obtidas de forma aleatória. Este consumidor virtual particular percebe maior utilidade para a seguinte configuração de veículo: marca B, potência de 90 ou 130 [HP], acabamento em tecido, pintura metálica, freios com ABS, e preço de 37.000 unidades monetárias. Baseado na hipótese de decisão de compra do produto de maior utilidade, esta seria a escolha deste consumidor particular caso esta configuração estivesse presente no mercado.

Atributo	Importância	Nível	Utilidade
Marca	17,07%	A	-0,238
		B	0,619
		C	-0,381
Potência	9,76%	90 [HP]	0,333
		110 [HP]	-0,667
		130 [HP]	0,333
Acabamento	17,07%	tecido	0,476
		veludo	-0,524
		couro	0,048
Pintura	7,32%	sólida	0,111
		metálica	0,444
		perolizada	-0,556
Sistema de freios	31,71%	sem ABS	-0,500
		com ABS	0,500
Preço de venda	17,07%	\$37.000	0,429
		\$40.000	0,143
		\$43.000	-0,571

Figura 4.17 – Importâncias e utilidades de um consumidor virtual

4.4.3 Resultados do Processo de Configuração dos Produtos

A aplicação dos Algoritmos Genéticos na definição das configurações dos três veículos que serão lançados pela marca A seguiu os passos do fluxograma mostrado nas Figuras 4.2 e 4.3. Os resultados obtidos do processo de evolução da: utilidade, participação de mercado, receita, e lucro para o fabricante A são mostrados nas próximas seções. Para todas as simulações realizadas foram utilizados: população inicial de 200 alternativas de configurações (exceção para configurações de máxima utilidade, neste caso a população é de 100 alternativas); seleção por torneios de 5 indivíduos; 80% da população é obtida de cruzamentos e 20% é mantida para a próxima geração; cruzamentos definidos por um ponto de combinação; 10% dos indivíduos da população sofre mutação a cada geração; decisão de aquisição, quando

necessária, pela máxima utilidade; o processo evolutivo é considerado encerrado após 5 gerações sem ocorrer alteração no cromossomo mais bem avaliado da população. Em todos os casos o processo evolutivo foi executado 5 vezes e sempre houve convergência das configurações obtidas.

4.4.4 Resultados – Atributos para Máxima Utilidade dos Consumidores

A definição das configurações dos produtos que resultem em máxima utilidade para os consumidores é obtida somando-se as utilidades totais para cada indivíduo dos produtos oferecidos. Neste exemplo são obtidas as configurações de 1 produto, 2 produtos e 3 produtos do fabricante A, buscando maximizar a satisfação dos consumidores (maior utilidade). Nas configurações dos produtos obtidas pelo processo evolutivo, a utilidade geral do grupo de consumidores aumenta à medida que mais produtos de configurações diferentes estão disponíveis aos consumidores (quanto maior o número de produtos, mais provável que alguma configuração satisfaça um consumidor particular). Apesar desta abordagem ser mais indicada para a configuração de serviços públicos do que produtos industriais ela será empregada no exemplo proposto como ilustração desta abordagem de configuração dos produtos. Neste processo de configuração, desconsidera-se a existência dos concorrentes e deseja-se conhecer, apenas, quais são as configurações dos produtos de marca A que resultem em maior satisfação dos consumidores (representados pelas escolhas dos 100 consumidores virtuais).

A primeira configuração ilustrada é a do produto que maximiza a satisfação do grupo de consumidores virtuais. Neste caso não se trata de uma família de produtos, mas de apenas um produto. O resultado do processo evolutivo (utilizando Algoritmos Genéticos) é uma configuração de produto cuja soma das utilidades para os 100 consumidores virtuais é 56,061438. A configuração obtida do processo de otimização pode ser vista no quadro da Figura 4.20, configuração (Cf) 1.

Caso sejam disponibilizados 2 produtos aos consumidores virtuais, suas configurações 'ideais' resultariam numa utilidade total de 150,44614. A Figura 4.18 ilustra a evolução de uma família composta por 2 produtos até atingir a máxima utilidade para estes consumidores. As

configurações destes produtos são apresentadas no quadro da Figura 4.20, configurações (Cf) 1 e 2.

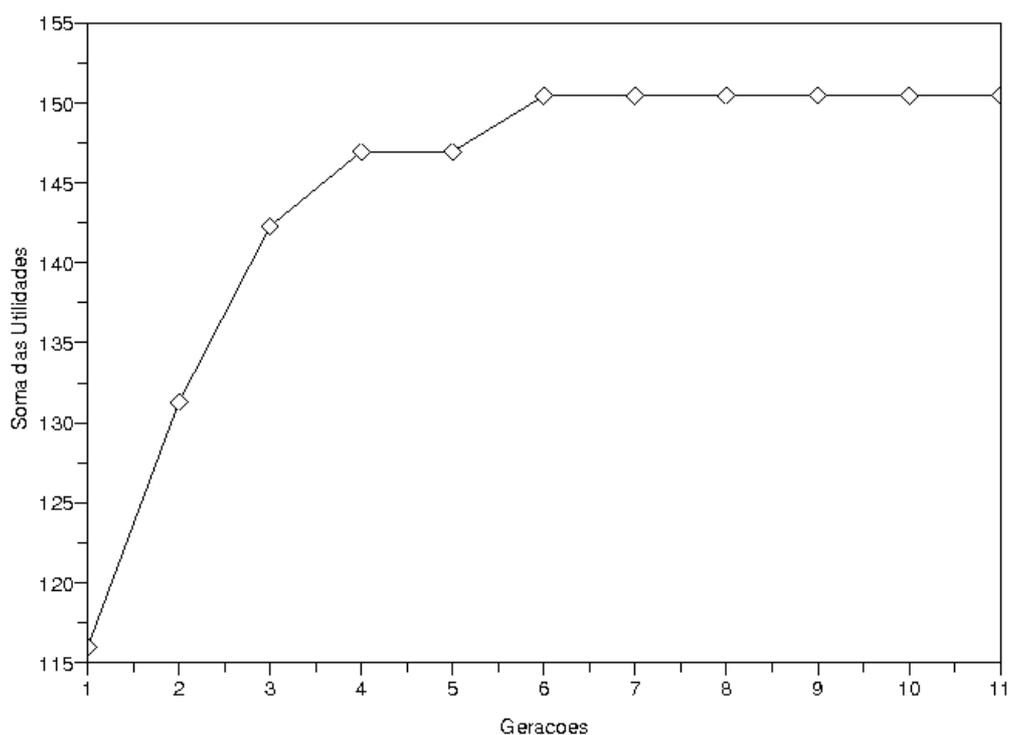


Figura 4.18 – Comportamento da evolução para configuração de 2 produtos com máxima utilidade

Finalmente, as configurações dos produtos de uma família composta de 3 integrantes também podem ser obtidas com o objetivo de maximizar a utilidade dos consumidores virtuais. O processo evolutivo de otimização destas configurações é ilustrado na Figura 4.19. As configurações definidas no processo de otimização resultam em uma utilidade total para os consumidores virtuais de 153,42233. Estas configurações são mostradas no quadro da Figura 4.20, configurações (Cf) 1, 2 e 3.

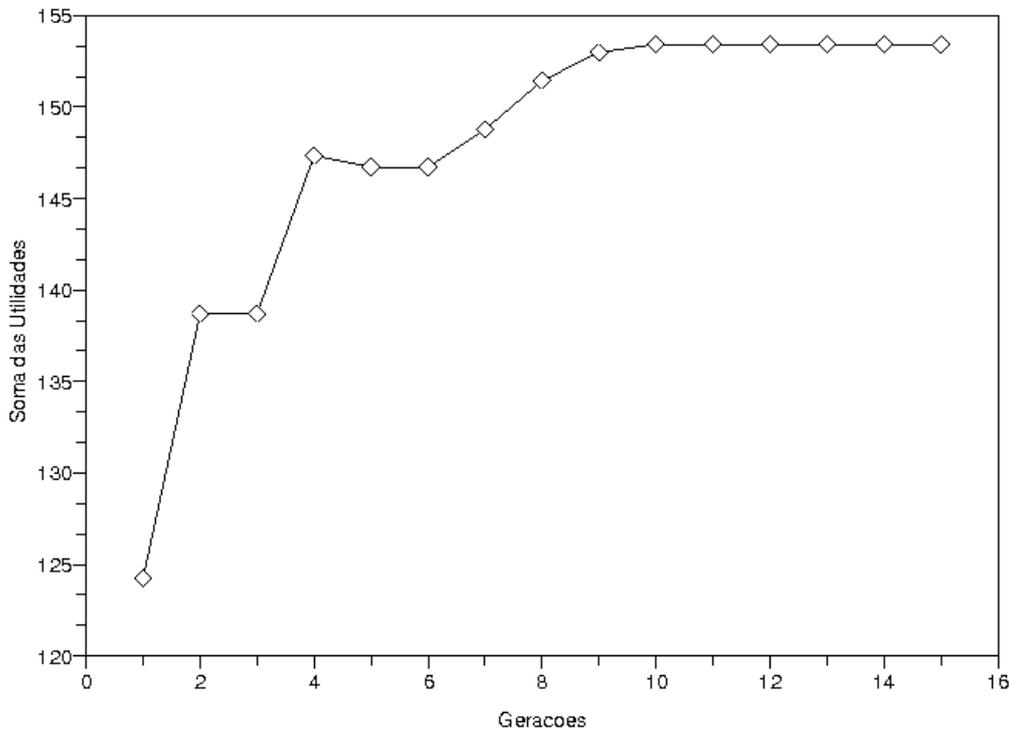


Figura 4.19 – Comportamento da evolução para configuração de 3 produtos com máxima utilidade

Marca	Demais Atributos	Cf
A	potência:90, acabamento:veludo, pintura:metálica, freios:c/ABS, preço:\$37.000	1
	potência:130, acabamento:couro, pintura:perolizada, freios:s/ABS, preço:\$40.000	2
	potência:110, acabamento:veludo, pintura:perolizada, freios:c/ABS, preço:\$37.000	3

Figura 4.20 – Configurações dos veículos da marca A para otimizar a utilidade dos consumidores

Nota-se que existe uma grande variação entre a utilidade total (satisfação dos consumidores) entre uma oferta de 2 produtos e a oferta de apenas 1 produto pelo fabricante. Existe, porém, uma pequena diferença de utilidade total entre a oferta de 3 e 2 produtos diferenciados aos consumidores virtuais. Considerando o objetivo de oferecer produtos que resultem na máxima utilidade total para os consumidores (utilizados no exemplo), o desenvolvimento de 3 variações de produto não traria uma melhora significativa da sua satisfação em relação ao

desenvolvimento de 2 variações.

4.4.5 Resultados – Atributos para Máxima Participação no Mercado

Nesta alternativa de definição da configuração dos produtos de uma família, é necessário que sejam conhecidas as configurações dos produtos concorrentes. Para ilustrar esta alternativa de configuração, são utilizados os 5 produtos concorrentes apresentados na Figura 4.15. Estes 5 produtos são oferecidos aos consumidores por dois fabricantes diferentes. O objetivo desta alternativa de configuração dos produtos é tomar parcela de mercado dos produtos concorrentes. Para o mercado representado pelos consumidores virtuais, as participações de mercado dos 5 produtos dos fabricantes B e C estão listados no quadro da Figura 4.21. Estas participações desconsideram os produtos do fabricante A, que, deseja-se, sejam configurados.

Marca	Cf	Participação
B	1	2,0%
	2	4,5%
C	1	15,5%
	2	28,5%
	3	49,5%

Figura 4.21 – Participação de mercado das configurações dos fabricantes B e C

Para definir as configurações dos, assumidos, 2 produtos de uma família para concorrer no mercado disputado pelos fabricantes B e C, o algoritmo evolutivo de busca para maior participação de mercado foi executado. A evolução das melhores configurações da população, de acordo com a função objetivo, está ilustrada na Figura 4.22. As configurações obtidas do processo evolutivo resultam em uma participação conjunta de mercado, para a marca A, estimada de 93,5%. Isto significa que 93,5% dos consumidores virtuais vêem mais utilidade em uma das duas configurações de produto oferecidos pelo fabricante A que as demais configurações de automóveis oferecidas pelos fabricantes B e C.

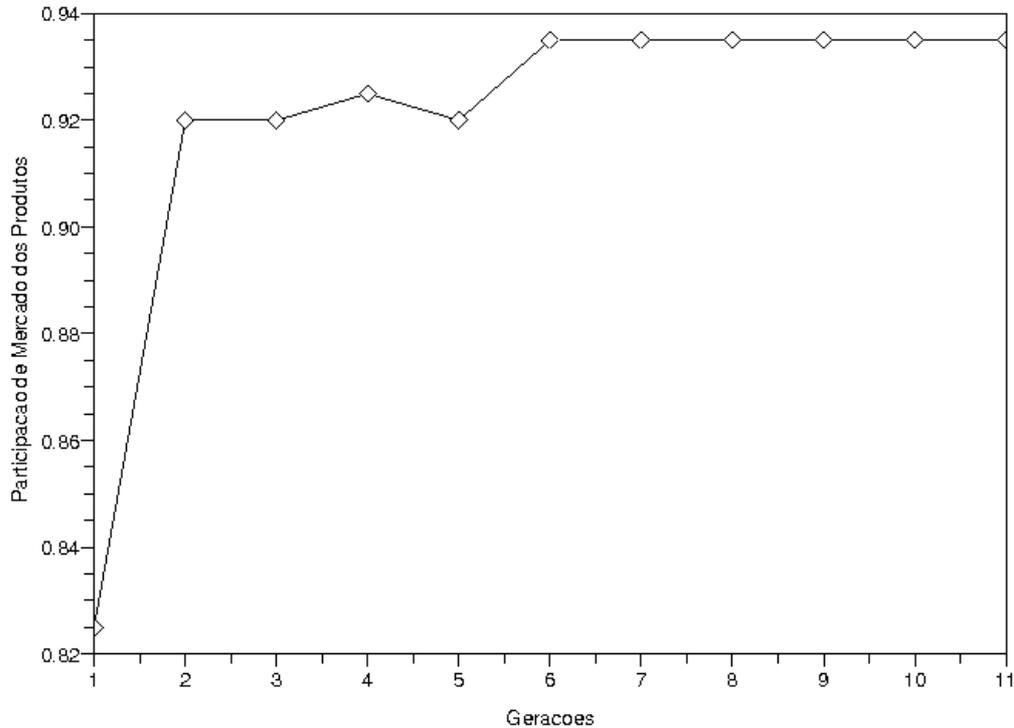


Figura 4.22 – Comportamento da evolução para configuração de 2 produtos com máxima participação de mercado

As configurações definidas pelo processo evolutivo para o fabricante A são mostradas na Figura 4.23. As participações de mercado dos produtos das marcas B e C cujas configurações são mostradas na Figura 4.15 e dos produtos da marca A configuradas conforme a Figura 4.23 são apresentadas na Figura 4.24. Nesta tabela pode-se ver que a participação dos concorrentes foi reduzida significativamente quando inseridas no mercado as configurações da marca A.

Marca	Demais Atributos	Cf
A	potência:90, acabamento:tecido, pintura:metálica, freios:c/ABS, preço:\$37.000	4
	potência:130, acabamento:couro, pintura:perolizada, freios:s/ABS, preço:\$40.000	2

Figura 4.23 – Configurações de veículos da marca A para maximizar a participação no mercado

Marca	Cf	Participação
A	4	60,0%
	2	33,5%
B	1	-
	2	-
C	1	1,0%
	2	4,5%
	3	1,0%

Figura 4.24 – Participação de mercado das configurações dos fabricantes A, B e C

4.4.6 Resultados – Atributos para Máxima Receita

Definir a configuração dos produtos da família para maximizar a receita depende tanto da parcela de mercado conquistada pelos produtos quanto seus preços. Para o exemplo desenvolvido nestas seções, as configurações otimizadas dos produtos para máxima receita estão mostradas no quadro da Figura 4.26. Estas configurações foram obtidas pelo processo evolutivo ilustrado na Figura 4.25, considerando a competição com os produtos das marcas B e C. A receita esperada para as configurações de produtos da marca A é $3,92E+8$ [unidades monetárias]. O produto da marca A e configuração (Cf) 5 deve contribuir com $2,58E+8$ [unidades monetárias] e o produto de com a configuração (Cf) 2 deve contribuir com $1,34E+8$ [unidades monetárias] da receita estimada.

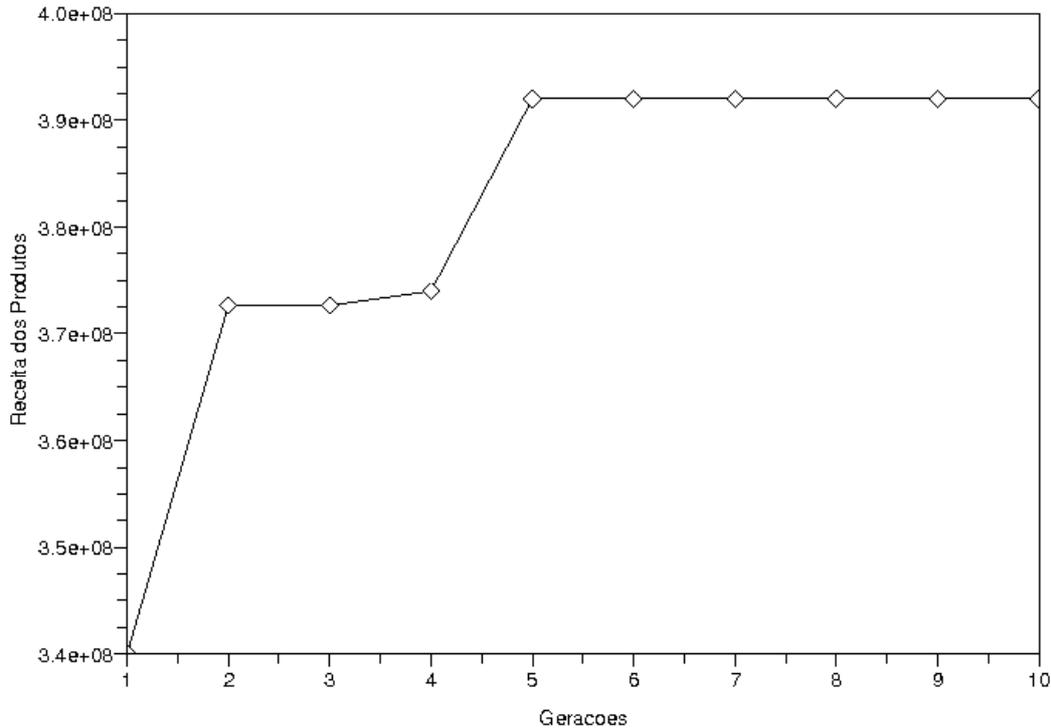


Figura 4.25 – Comportamento da evolução para configuração de 2 produtos para maximizar a receita

Marca	Demais Atributos	Cf
A	potência:90, acabamento:veludo, pintura:metálica, freios:c/ABS, preço:\$43.000	5
	potência:130, acabamento:couro, pintura:perolizada, freios:s/ABS, preço:\$40.000	2

Figura 4.26 – Configurações de veículos da marca A para otimizar a receita

4.4.7 Resultados – Atributos para Máximo Lucro

A configuração dos produtos com o objetivo de maximizar o lucro é semelhante à configuração dos produtos para maximizar a receita. Para maximizar o retorno necessita-se, porém, que sejam conhecidas, também, estimativas dos custos para as variações dos atributos. As configurações que foram obtidas dos produtos da marca A para maximizar o retorno são as mesmas obtidas para maximizar o lucro e estão mostradas no quadro da Figura 4.26. Neste

exemplo foram considerados, novamente, os produtos concorrentes das marcas B e C listados na Figura 4.15. O retorno esperado da marca A para os produtos mostrados no quadro da Figura 4.26 (considerando apenas os custos dos atributos variantes) é de $3,359E+8$ [unidades monetárias]. O produto de configuração (Cf) 5 contribui com 67% deste total e o produto de configuração (Cf) 2 contribui com os restantes 33%. O comportamento da evolução das configurações para máximo lucro é mostrado na Figura 4.27

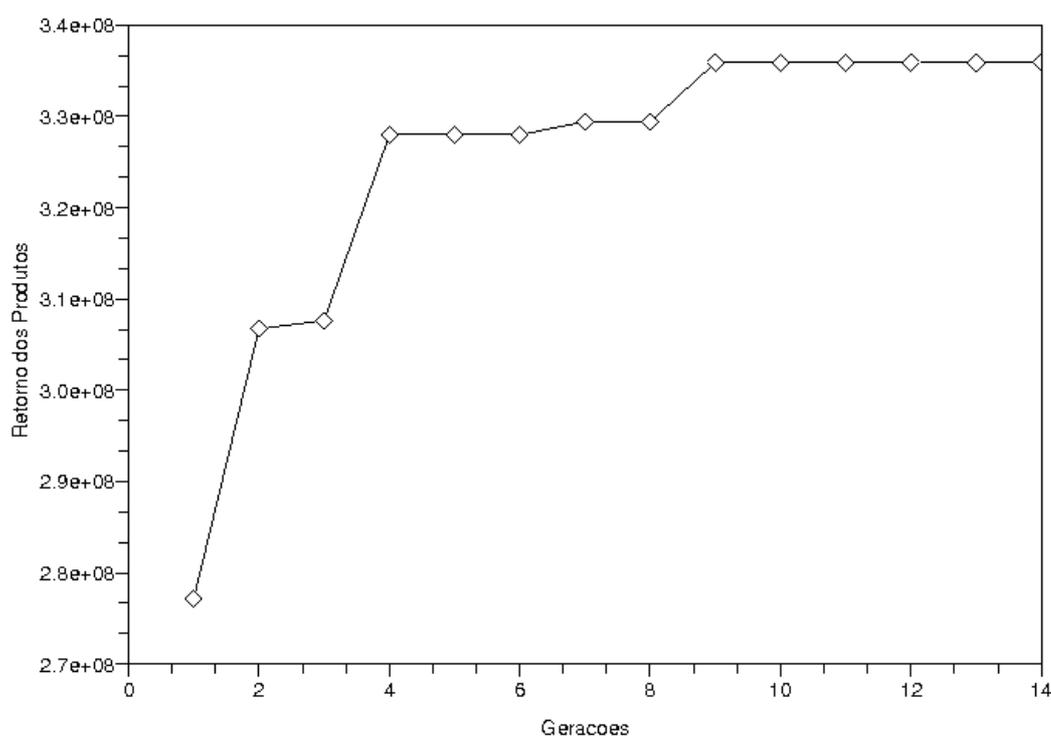


Figura 4.27 – Comportamento da evolução das configurações de veículos da marca A para otimizar o lucro

4.5 ESPELHAMENTO DA DESCRIÇÃO DOS PRODUTOS

As arquiteturas de enfoque modular para famílias de produtos são definidas pelos agrupamentos funcionais que são integrados e desenvolvidos como componentes. Portanto, para que se defina uma arquitetura de enfoque modular, é necessário que as funções, e suas

variações, que são executadas pelos integrantes da família de produtos sejam conhecidas. Além disto, admitindo que os integrantes de uma família de produtos podem ser descritos pelos seus atributos (como visto neste capítulo), esta mesma descrição deve ser espelhada nas funções executadas pela família. Uma ferramenta de auxílio à formalização desta transformação é sugerida nesta seção.

A transformação sugerida neste trabalho é baseada numa matriz relacional entre os atributos dos produtos e suas funções. Logo, é necessário que as funções dos produtos, assim como seus atributos, tenham sido identificadas previamente. Para que os produtos da família sejam descritos em termos de suas variações funcionais, sugere-se que sejam seguidos os seguintes passos:

- Descrição dos produtos no espaço dos atributos e seus níveis, por exemplo: o produto X pode ser descrito como uma seqüência de níveis de atributos (2 3 1 1 1 3: nível 2 do atributo 1, nível 3 do atributo 2, nível 1 do atributo 3... e assim por diante) e identificação das funções executadas;
- Cálculo do número de variações de cada atributo para formar os produtos da família; por exemplo: quando todos os integrantes da família têm o mesmo nível de um atributo sua variação é 1, quando os níveis são diferentes, o número de variações é igual ao número de níveis diferentes entre os integrantes da família de produtos;
- O passo seguinte é preencher uma matriz relacional entre as funções e os atributos dos produtos para identificar a interdependência, sugere-se o uso de três graus de intensidade nesta relação (forte, médio e fraco);
- Conhecendo-se o número de variações dos níveis de cada atributo e a relação entre as funções e os atributos dos produtos, pode-se definir o número de variações funcionais necessárias para que sejam gerados os níveis desejados dos atributos; por exemplo: se uma função apresenta uma forte relação com determinado atributo e este atributo deve variar em três níveis, a função deverá, potencialmente, apresentar três níveis de desempenho diferenciados;
- Após a identificação do número de variações funcionais necessárias para cada atributo, pode-se identificar o número de variações de cada função para a formação da

família de produtos; neste passo verifica-se para uma função particular, entre todos os atributos, qual o maior número de variações necessárias; este número será o menor número de variações funcionais necessárias para gerar a família; a soma, novamente para uma função particular, ao longo de todos os atributos, das variações necessárias resulta no maior número de variações funcionais para gerar a família de produtos (limitado pelo número de produtos da família); o número de variações deverá estar situado entre estes extremos;

- Finalmente faz-se uma descrição dos produtos em termos das variações funcionais necessárias.

Na aplicação dos passos descritos, sugere-se o uso de uma ferramenta para facilitar a transformação da descrição dos produtos do espaço dos atributos para o espaço das funções. Esta ferramenta é ilustrada pela Figura 4.28. Na figura, o primeiro passo descrito nesta seção (descrição dos produtos pela ótica dos seus atributos) é ilustrado pela matriz do canto esquerdo superior. O passo seguinte (identificação do número de variações dos atributos) está representado na figura pela coluna imediatamente à direita da matriz descrita no primeiro passo. Ainda na figura, seguindo à direita da coluna de identificação do número de variações do produto, encontra-se a matriz relacional funções/atributos. A matriz do canto direito superior da ilustração identifica o número de variações necessárias de cada função para gerar o número de níveis desejado dos atributos. Utilizando as informações desta matriz, são definidos os números de variações funcionais para a família de produtos, posicionados ao centro da figura. O último passo está ilustrado na porção inferior da figura que ilustra a descrição dos integrantes da família de produtos no espaço funcional.

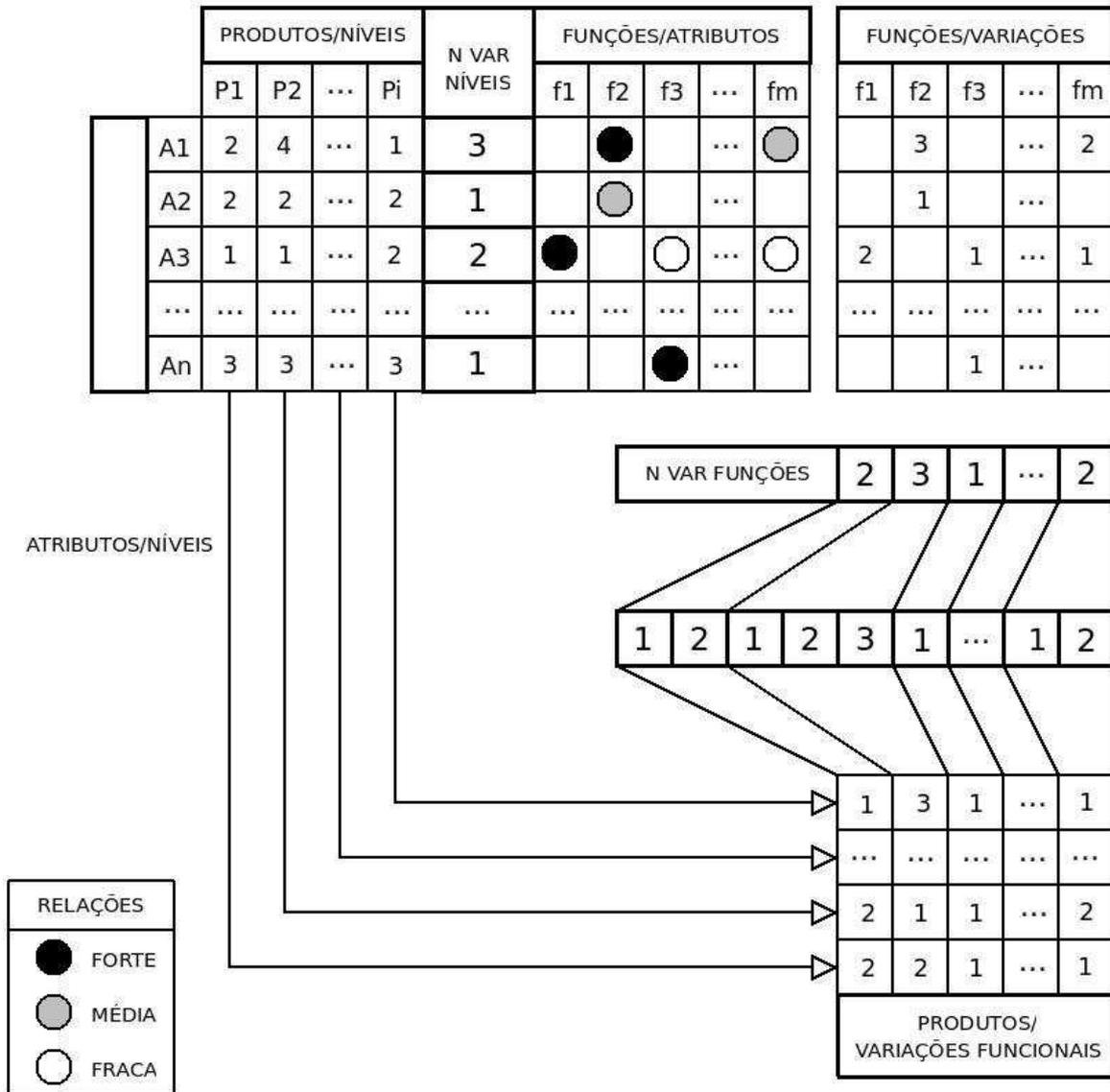


Figura 4.28 – Ferramenta para transformação de espaço da descrição dos produtos

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar dos Algoritmos Genéticos não garantirem que os máximos das funções objetivo sejam encontrados, eles mostraram-se muito adequados à busca das melhores configurações dos integrantes de uma família de produtos. Principalmente para a definição das configurações contra produtos concorrentes, caso da busca das configurações para máxima participação de

mercado, receita ou lucro. Haja vista que as propostas deste trabalho para codificação, combinação e mutação dos cromossomos representativos de uma família de produtos, em conjunto com os passos dos Algoritmos Genéticos, resultaram em configurações de produtos que, da perspectiva dos consumidores, suplantavam as configurações dos produtos concorrentes por larga margem.

Apesar do sucesso do processo de busca das configurações dos produtos auxiliada pelos Algoritmos Genéticos, a definição das configurações está escorada em informações de preferências e no modelo de decisão de compra dos consumidores. A confiabilidade das informações das preferências dos consumidores depende da escolha dos atributos (e seus níveis) para a descrição dos produtos, a abordagem de medição das preferências adotada, a seleção dos pesquisados (potenciais consumidores) e o número de consumidores pesquisados. A escolha dos atributos para a descrição dos produtos e a abordagem de medição das preferências adotada depende da experiência prévia dos desenvolvedores da família de produtos. Já a seleção e a quantidade de indivíduos pesquisados deve ser representativa do mercado que a família de produtos disputará.

Para o caso de estarem disponíveis um número significativo de pesquisas de preferências dos consumidores, o modelo de escolha do produto de máxima utilidade pode ser utilizado diretamente para a estimativa da parcela de mercado que uma determinada configuração de produto pode conquistar. Caso contrário, a aplicação de uma janela para que os produtos de maior utilidade (para cada consumidor) sejam considerados com a mesma probabilidade de compra deve ser aplicada. Outra alternativa, nestes casos, é utilizar o modelo probabilístico de aquisição dos produtos.

A transformação da descrição dos produtos pelos seus atributos para a descrição funcional é uma atividade que depende de decisões tomadas pelos desenvolvedores da família de produtos. A ferramenta sugerida neste capítulo é uma alternativa para a formalização desta atividade. A ferramenta inibe o aparecimento de grandes discrepâncias entre as descrições dos produtos nos domínios funcional e das configurações. Esta transformação é muito importante pois a descrição funcional dos produtos, segundo este trabalho, é uma informação necessária para o processo de modularização da arquitetura da família de produtos, tema que é abordado no próximo capítulo.

5 DEFINIÇÃO DA ARQUITETURA

Segundo a tese proposta, pode-se definir uma arquitetura de enfoque modular para uma família de produtos conhecendo-se os níveis dos atributos dos integrantes da família e os modelos de funcionamento dos produtos. No capítulo anterior foram obtidas as configurações dos produtos auxiliado por procedimentos evolutivos, assim como a descrição equivalente dos produtos no domínio funcional. A partir destas definições, na primeira parte deste capítulo, a descrição dos produtos no espaço funcional, tanto da perspectiva da variedade desejada como de suas interações, é utilizada na proposta de uma métrica centrada na estimativa dos custos de desenvolvimento e produção para a família de produtos. Em seguida descreve-se a aplicação dos algoritmos evolutivos, em conjunto com a métrica de custos, para a escolha de uma arquitetura de enfoque modular para a família de produtos. Tanto o algoritmo de auxílio à escolha de uma alternativa de arquitetura de enfoque modular como a métrica proposta são testados sobre um exemplo de família de produtos desenvolvido com esta finalidade. Na última seção, as considerações finais sobre as propostas deste capítulo são apresentadas.

5.1 MÉTRICA HEURÍSTICA DE CUSTOS

Nesta seção são lançadas as bases da métrica de custos para a avaliação relativa das diversas alternativas de arquitetura para uma família de produtos. A definição da arquitetura de enfoque modular específica para uma família de produtos particular pode ser feita escolhendo-se a alternativa que apresenta a menor estimativa dos custos, segundo a métrica proposta.

A métrica de custos proposta para avaliação das alternativas de arquiteturas é composta de duas parcelas. A primeira parcela estima os custos relativos de uma determinada alternativa de arquitetura para a família de produtos considerando os custos de desenvolvimento de suas funções. Esta parcela dos custos é derivada dos investimentos realizados antes do início da produção e são refletidos como uma parcela do custo final dos produtos. A segunda parcela trata da estimativa dos custos após o início da produção e está ligada aos custos de preparação das interfaces entre os componentes e a montagem dos produtos. Esta parcela é calculada

considerando o custo de preparação das interfaces e montagem entre os módulos (chamado neste trabalho de custo de montagem I) e os custos de fabricação e montagem de um determinado agrupamento de funções (módulo), considerando seu potencial de redução devido à integração funcional. Esta parcela de custo é chamada neste trabalho de custo de montagem II. A métrica proposta para auxílio à definição da arquitetura de uma família de produtos admite que:

- os custos de desenvolvimento de um grupo de funções são equivalentes à soma dos custos de desenvolvimento de suas funções individuais (que podem ser estimadas de forma relativa);
- os custos de interface entre as funções são iguais aos custos de preparação das interfaces e de montagem dos produtos (e podem, também, ser estimados de forma relativa);
- o potencial de integração das funções de um módulo pode ser utilizado para estimar a redução dos custos de produção e montagem de um agrupamento funcional; e
- o número de funções e suas interações definem o potencial de integração de um módulo.

De forma preliminar pode-se escrever uma expressão para o cálculo da estimativa de custo de uma determinada alternativa de arquitetura de enfoque modular para a família de produtos somando as duas parcelas de custos citadas (desenvolvimento e preparação de interface e montagem). Como a natureza dos custos de desenvolvimento é diferente da natureza dos custos de montagem, é necessário estabelecer seus pesos na composição da estimativa do custo total. A expressão (5.1) ilustra o cálculo proposto.

$$C_E^i = \alpha \cdot C_D^i + \beta \cdot (C_{M-I}^i + C_{M-II}^i) \quad (5.1)$$

Na expressão (5.1), C_E^i é a estimativa do custo total da i -ésima arquitetura para a família de produtos, C_D^i é o custo de desenvolvimento da i -ésima arquitetura, C_{M-I}^i é o custo de preparação de interface e montagem entre módulos, para a i -ésima arquitetura, e C_{M-II}^i é o

custo de preparação de interface e montagem intra módulos, também para a i -ésima arquitetura. Ainda na expressão (5.1), α é o coeficiente que representa a parcela do custo devido aos investimentos realizados durante o desenvolvimento das funções da família de produtos e β é o coeficiente que representa a parcela dos custos devidos à preparação das interfaces e a montagem. Os procedimentos de cálculo propostos para cada uma das parcelas da estimativa de custo são detalhados nas próximas seções.

5.2 ESTIMATIVA DO CUSTO DE DESENVOLVIMENTO

Nesta seção é proposto um procedimento de cálculo para os custos de desenvolvimento das funções derivados da escolha de uma alternativa de arquitetura de enfoque modular para uma família de produtos, componente C^i_D da expressão (5.1). Na estimativa dos custos de desenvolvimento, é necessário que sejam conhecidas (ou estimados) os custos relativos de desenvolvimento das funções da família de produtos e as descrições funcionais dos produtos. Para auxiliar o entendimento da proposta de cálculo da estimativa dos custos de desenvolvimento considere uma família de quatro produtos (p1, p2, p3 e p4) que realizam, cada um deles, cinco funções (f1, f2, f3, f4 e f5, cada função pode apresentar uma variação específica para um produto particular, por exemplo uma variação de desempenho). O quadro da Figura 5.1 ilustra a descrição dos quatro produtos desta família no espaço funcional – os números listados correspondem à variação de uma função específica necessária para a formação de cada um dos produtos e o quadro da Figura 5.2 ilustra uma estimativa dos investimentos relativos de desenvolvimento de cada uma das variações das cinco funções da família de produtos.

Produtos	Descrição Funcional				
	f1	f2	f3	f4	f5
p1	1	1	1	2	1
p2	1	1	1	1	2
p3	1	3	1	2	1
p4	1	2	1	1	3

Figura 5.1 – Exemplo de descrição funcional dos produtos de uma família

Variações	Estimativa dos Custos Relativos de Desenvolvimento das Funções				
	f1	f2	f3	f4	f5
1	5	3	4	1	5
2	-	4	-	2	6
3	-	5	-	-	7

Figura 5.2 – Exemplo de estimativa dos custos relativos de desenvolvimento das funções

O custo de desenvolvimento de uma arquitetura particular é obtido somando, para todos os seus módulos, o custo relativo de desenvolvimento de suas funções. A expressão (5.2) ilustra o procedimento de cálculo do custo de desenvolvimento proposto. O custo de desenvolvimento relativo, expressão (5.3), é obtido dividindo o resultado da expressão (5.2) pelo custo de desenvolvimento dos produtos de acordo com uma arquitetura integral, que é sempre o maior custo de desenvolvimento possível.

$$C_{AD}^k = \sum_{i=1}^{N_M} \sum_{j=1}^{N_{Vi}} cd_{ij}^k \quad (5.2)$$

$$C_D^k = \frac{C_{AD}^k}{C_{AD}^I} \quad (5.3)$$

Na expressão (5.2), C_{AD}^k é o custo absoluto de desenvolvimento estimado da k -ésima arquitetura, cd_{ij}^k é o custo estimado de desenvolvimento da j -ésima variação do i -ésimo módulo, N_{Vi} são as variações do i -ésimo módulo da arquitetura definida por N_M módulos. Na expressão (5.3) C_D^k é o custo relativo de desenvolvimento da k -ésima arquitetura e C'_{AD} é o custo de desenvolvimento absoluto de uma arquitetura totalmente integral para os produtos.

Para ilustrar o uso das expressões apresentadas, considere os dados dos quadros das Figuras 5.1 e 5.2. Considere, também, uma arquitetura particular de enfoque modular para a família de produtos que define um mapa de alocação função-componente da seguinte forma: $\{\{f1\ f2\} + \{f3\ f4\ f5\}\}$, ou seja, as funções 1 e 2 definem um módulo e as funções 3, 4 e 5 definem outro módulo.

O custo estimado de desenvolvimento da primeira variação de um módulo composto pelas funções 1 e 2 é 8 (5+3, segundo o quadro da Figura 5.2); porém, para formar todos os produtos da família, devem ser desenvolvidos três variações deste módulo: uma variação para os produtos 1 e 2, uma variação para o produto 3 e uma variação para o produto 4. Já o custo estimado de desenvolvimento da primeira variação do módulo composto pelas funções 3, 4 e 5 é 11 (4+2+5, novamente segundo o quadro da Figura 5.2). Este módulo também deve ser desenvolvido em 3 variações para gerar a família desejada de produtos: uma variação para os produtos 1 e 3, uma variação para o produto 2 e uma variação para o produto 4. Os custos de desenvolvimento das variações destes módulos estão compilado no quadro da Figura 5.3.

Módulo	Variação	cd
{f1 f2}	1	8
	2	10
	3	9
{f3 f4 f5}	1	11
	2	11
	3	12

Figura 5.3 – Custos estimados de desenvolvimento dos módulos

A aplicação da expressão (5.2) aos dados do quadro da Figura 5.3 resulta num custo de desenvolvimento para a arquitetura ilustrada ($\{f1\ f2\} + \{f3\ f4\ f5\}$) de 61. Para o uso deste cálculo na expressão do custo total, (5.1), o custo de desenvolvimento deve ser normalizado. A normalização é feita dividindo o custo de desenvolvimento de uma arquitetura particular pelo custo de desenvolvimento de uma arquitetura integral, expressão (5.3). Utilizando os dados deste exemplo, o custo de desenvolvimento dos produtos da família segundo uma arquitetura integral é 80. Portanto, o custo de desenvolvimento normalizado desta arquitetura particular ($\{f1\ f2\} + \{f3\ f4\ f5\}$) é de 0,7625.

A arquitetura ilustrada é apenas uma entre as 52 alternativas de arquitetura (da perspectiva da alocação função-componente) possíveis para produtos definidos por 5 funções. Com o objetivo de identificar a estimativa do custo de desenvolvimento relativo das demais alternativas de arquitetura, o procedimento de cálculo descrito deve ser repetido para as restantes 51 alocações função-componente. Com o resultado destes cálculos, pode-se traçar um gráfico que ilustra a variação dos custos de desenvolvimento relativos para a família de produtos, proposto neste trabalho, para cada alternativa de arquitetura – Figura 5.4. Na figura, a primeira alternativa de arquitetura (mais à esquerda) é totalmente integral, ou seja, para o exemplo em questão, os quatro produtos são desenvolvidos de maneira individualizada, desconsiderando suas funcionalidades comuns. A última alternativa de arquitetura (mais à direita na figura), corresponde a uma arquitetura totalmente modular, ou seja, são exploradas as comunalidades funcionais entre os integrantes da família de produtos.

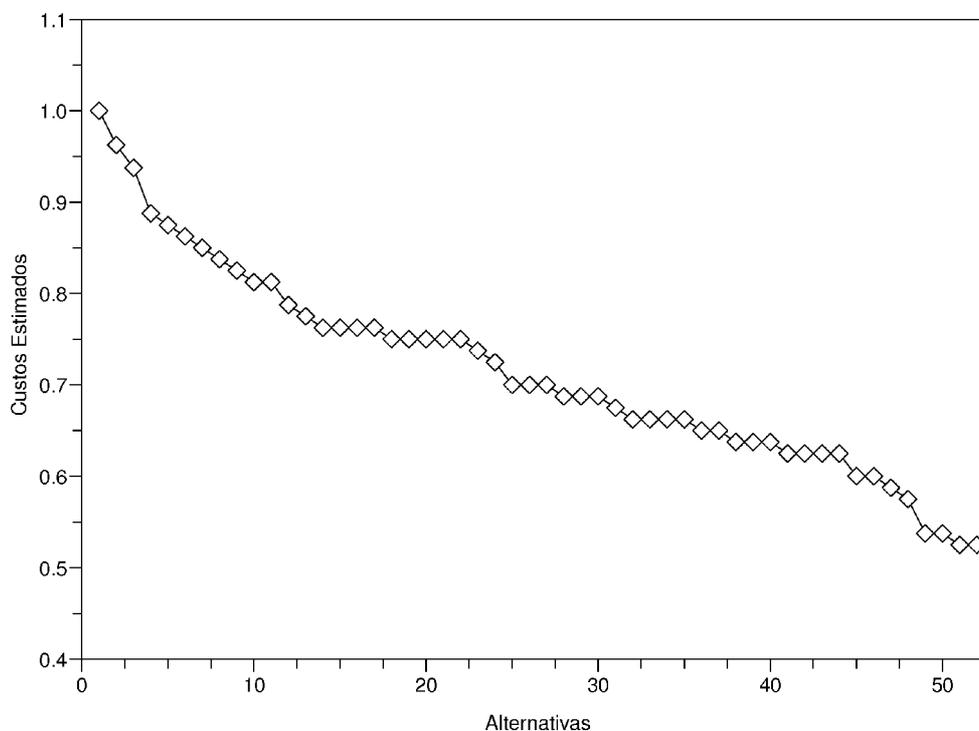


Figura 5.4 – Custos estimados de desenvolvimento das alternativas de arquiteturas

5.3 ESTIMATIVA DO CUSTO DE INTERFACES

Após a estimativa dos custos de desenvolvimento da família de produtos para as alternativas de arquitetura, nesta seção e na próxima desenvolve-se uma proposta para estimativa dos custos de preparação de interface e montagem. Esta seção é dedicada à formalização de uma estimativa para o custo de preparação de interface e montagem entre módulos dos produtos de uma família considerando uma alternativa de arquitetura de enfoque modular particular. A próxima seção trata da estimativa destes mesmos custos para as funções intra módulos.

A estimativa do custo de preparação de interface e montagem entre módulos depende do número de interfaces entre os módulos da alternativa de arquitetura particular, dos tipos de interfaces e da estimativa dos custos de preparação e montagem para cada tipo de interface. Estas informações, exceção às estimativas dos custos de preparação e montagem, podem ser obtidas dos modelos funcionais do produto (por exemplo: DSM, Estrutura de Funções, etc.).

Nesta proposta assume-se que os custos relativos de montagem para cada tipo de interface são estimáveis.

Para uma arquitetura particular, o número de interfaces entre módulos pode ser obtida, por exemplo, por inspeção do modelo de interação funcional dos produtos. O custo de montagem é calculado multiplicando o número de cada tipo de interface entre os vários módulos dos produtos pelo custo relativo de preparação de interface e montagem (estimado) e pelo volume de produção. A expressão (5.4) ilustra o cálculo proposto. Para se obter o valor relativo deste custo, expressão (5.5), o resultado do cálculo da expressão (5.4) é dividido pelo custo de preparação de interface e montagem de uma alternativa de arquitetura totalmente modular, que resulta no maior custo de preparação de interface e montagem possível para os produtos.

$$C_{AM-I}^k = \sum_{i=1}^{N_P} \sum_{j=1}^{N_{Mi}} VP_i (NIE_{ij}^m cm_m + NIE_{ij}^e cm_e + NIE_{ij}^s cm_s) \quad (5.4)$$

$$C_{M-I}^k = \frac{C_{AM-I}^k}{C_{AM-I}^M} \quad (5.5)$$

Na expressão (5.4), C_{AM-I}^k é o custo absoluto de preparação de interface e montagem entre módulos da k -ésima arquitetura da família de produtos, N_P é o número de produtos da família, N_{Mi} é o número de módulos do i -ésimo produto, VP_i é o volume de montagem do i -ésimo produto, NIE_{ij}^m é o número de interfaces de material do j -ésimo módulo do i -ésimo produto (os sobrescritos e e s indicam os números de interfaces de energia e sinal, respectivamente), cm_m é o custo relativo de montagem estimado para as interfaces de fluxo de material (os subscritos e e s indicam, novamente, os custos relativos de montagem para as interfaces com fluxo de energia e sinal, respectivamente). Na expressão (5.5), C_{M-I}^k é o custo relativo de montagem entre módulos da k -ésima arquitetura e C_{AM-I}^M é o custo de montagem dos produtos seguindo uma arquitetura totalmente modular.

Para efeitos de ilustração da aplicação das expressões (5.4) e (5.5), considere o conjunto de produtos e a arquitetura particular para a família propostos na seção anterior. Considere, que o

modelo funcional (da perspectiva de sistema) da Figura 5.6 para produtos de cinco funções (f1, f2, f3, f4 e f5; fs é a fronteira do sistema) seja representativo dos produtos da família. Estão ilustradas nesta figura as funções dos produtos e as interações funcionais de material (linha contínua cheia), energia (linha contínua) e sinal (linha tracejada). Considere, também, que os custos relativos de preparação e montagem para cada tipo de interface são estimados de acordo com os dados do quadro da Figura 5.5.

Custo Relativo de Preparação e Montagem (estimado)	Tipo de Interface		
	Material	Energia	Sinal
	3	2	1

Figura 5.5 – Estimativa dos custos relativos de montagem por tipo de interface

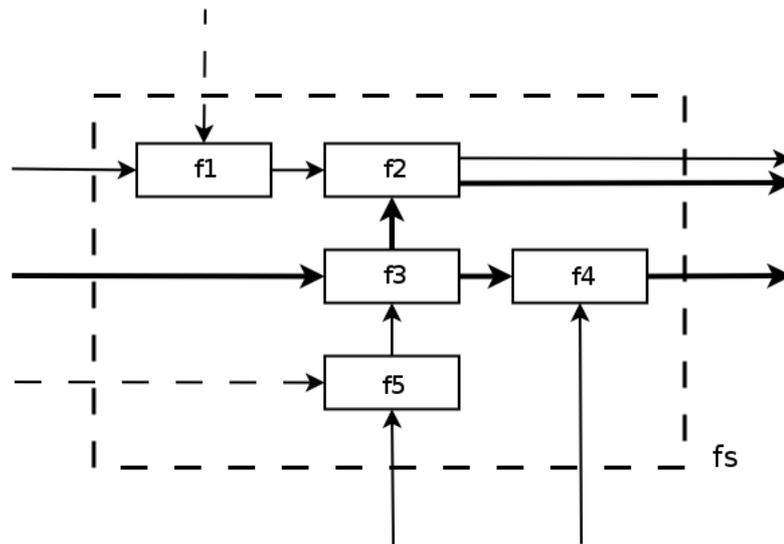


Figura 5.6 – Modelo funcional para os produtos da família

O número de interfaces entre cada um dos módulos da arquitetura sugerida pode ser obtido por inspeção. Para os dois módulos sugeridos no exemplo de cálculo da estimativa dos custos desta seção estas informações são resumidas no quadro da Figura 5.7.

Módulos	Interfaces entre Módulos		
	Material	Energia	Sinal
{f1 f2}	2	2	1
{f3 f4 f5}	3	2	1

Figura 5.7 – Número de interfaces entre módulos para o exemplo sugerido

A aplicação da expressão (5.4) sobre os dados dos quadros das Figuras 5.5 e 5.7, considerando volumes de produção de 100 unidades do produto 1; 80 do produto 2; 60 do produto 3; e 30 do produto 4, resulta num custo de preparação de interface e montagem entre módulos para o volume de produção e para esta arquitetura particular de 6750. Para uma arquitetura totalmente modular este custo é de 10530, o maior entre todas as alternativas de arquitetura de enfoque modular, utilizado para normalização. O custo estimado, normalizado (expressão (5.5)), para a alternativa de arquitetura sugerida, portanto, é de 0,6410 (14ª alternativa no gráfico da Figura 5.8 que ilustra a variação destes custos com as alternativas de arquitetura). Pode-se perceber na Figura 5.8 que o menor custo estimado de montagem corresponde à arquitetura totalmente integral (primeira marca à esquerda no gráfico) e o maior custo estimado de montagem corresponde à arquitetura totalmente modular (última marca à direita no gráfico). Pode-se, também, verificar que muitas alternativas de arquitetura de enfoque modular apresentam o custo máximo de preparação de interface e montagem entre módulos, isto acontece para as arquiteturas que definem módulos com funções sem nenhuma relação entre si.

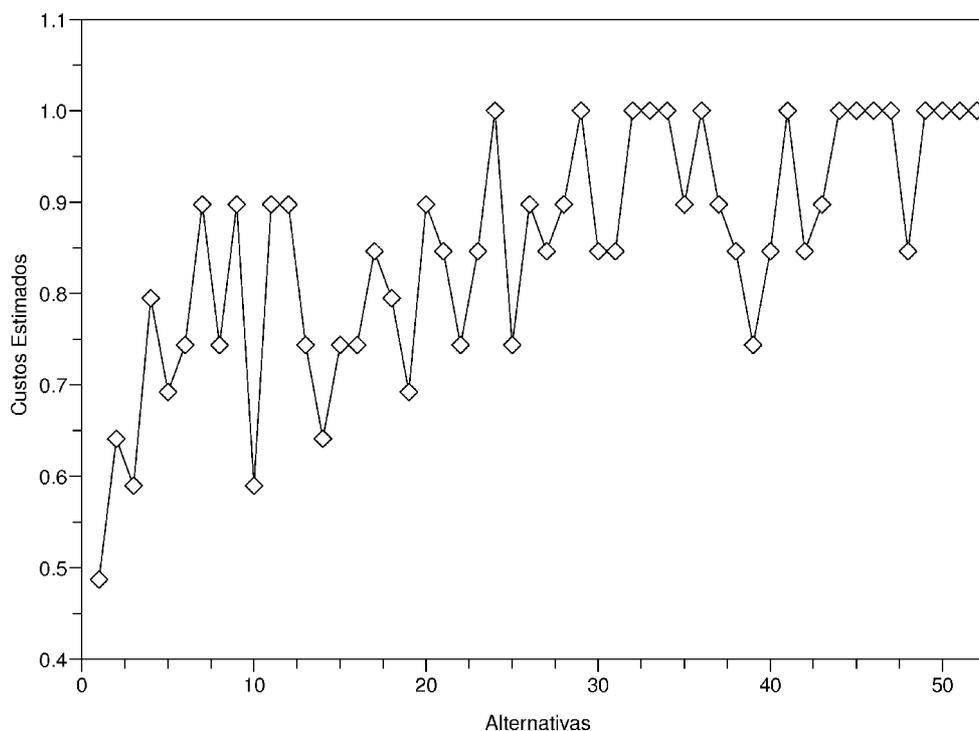


Figura 5.8 – Custos estimados de montagem entre módulos das alternativas de arquiteturas

5.4 POTENCIAL DE INTEGRAÇÃO DOS MÓDULOS

Até o momento, os custos de preparação de interface e montagem de um produto formado por um conjunto distinto de módulos depende do número de interfaces entre os módulos e dos custos estimados de preparação de interface e montagem. Imagina-se, inicialmente, que quaisquer que sejam as funções que definem um módulo particular, elas podem ser integradas. Com a integração presumida, as interfaces entre as funções de um mesmo módulo são desconsideradas, eliminando os custos de preparação de interface e montagem.

Porém, a integração não pode ser assumida como certa para qualquer agrupamento funcional, evidenciando a necessidade de uma medida do potencial de integração das funções de um módulo particular. Em estágios mais adiantados do desenvolvimento de produtos, quando já estão disponíveis informações sobre os componentes, pode-se estimar o potencial de integração (das partes) por uma análise de similaridades de processo e material (por exemplo).

Nos estágios iniciais do desenvolvimento dos produtos, no entanto, estas informações não estão disponíveis, forçando a definição de uma estimativa do potencial de integração de um módulo utilizando apenas informações sistêmicas do produto.

Nesta seção, propõe-se uma forma de estimar a parcela do custo de preparação de interface e montagem que pode, eventualmente, ser eliminada com a integração das funções de um módulo. Nesta proposta de potencial de integração, são considerados conhecidos apenas os modelos funcionais dos produtos, que representam as trocas de material, energia e sinal entre as funções.

A definição do potencial de integração proposto neste trabalho é composto de 2 componentes. O primeiro componente é a razão entre o número de interações e o número de funções de um agrupamento funcional (módulo). Assume-se que a integração potencial das funções do agrupamento tem relação direta com este componente; quanto maior esta razão, maior a possibilidade de integração funcional (esta razão pode variar entre 0 e ~1). O segundo componente considerado importante para definir o potencial de integração é a razão entre o número de funções que interagem com as demais funções do agrupamento funcional e o número total de funções do agrupamento. Também neste caso, quanto maior a razão (que varia entre 0 e 1), mais apto à integração está o agrupamento funcional. Portanto, na definição do cálculo do potencial de integração proposto, são considerados: o número de funções do agrupamento; o número de interações de material, energia e sinal entre as funções do agrupamento; e o número de funções que interagem com as demais funções do agrupamento.

Para o cálculo da estimativa do potencial de integração de um módulo, os 2 componentes, destacados no parágrafo anterior, são multiplicados. Esta proposta de cálculo para o potencial de integração de um módulo pode ser colocado na forma algébrica, expressão (5.6) (o número 2 que aparece no denominador da equação de estimativa do potencial de integração é utilizado porque as interações entre as funções são contadas aos pares).

$$P_M^m = \frac{N_M^m N_M^{fm}}{2 N_M^{f2}} \quad (5.6)$$

Na equação (5.6), P^m_M é o potencial de integração das funções do módulo M para a eliminação das interfaces de material, N^f_M é o número de funções do módulo, N^m_M é o número de interfaces de material do módulo, e N^{fm}_M é o número de funções que interagem com as demais funções do agrupamento, da perspectiva dos fluxos de material. Equações semelhantes à (5.6) podem ser escritas para os potenciais de integração das funções de um agrupamento sob a ótica das interações de energia e sinal.

Na formulação proposta para o potencial de integração funcional, a redução do custo de preparação de interface e montagem de um módulo será proporcional ao potencial de integração. O potencial de integração das funções de um agrupamento pode ser visto como a possibilidade de redução dos custos de preparação de interface e montagem de um módulo. Um potencial igual à unidade significa que existe o potencial de integração de todas as funções do agrupamento, portanto o custo de preparação de interface e montagem deste módulo pode ser considerado igual a zero. Por outro lado, um potencial de integração igual a zero, resulta em um custo de preparação de interface e montagem do módulo igual ao somatório dos custos de interface entre as funções do módulo. Portanto, para o módulo M , o custo de preparação de interface e montagem intramodular é obtido pela diferença entre estes potenciais e a unidade, multiplicados pelos respectivos custos de interface (os mesmos utilizados na seção anterior) e pelo número de interfaces intra módulo. Finalmente, o custo de preparação de interface e montagem intra módulos de uma alternativa de arquitetura pode ser estimado somando estes custos para cada um dos módulos dos produtos da família. A expressão (5.7) ilustra este procedimento de cálculo. Como antes, esta estimativa de custo pode ser normalizada considerando o custo máximo de montagem possível de uma arquitetura totalmente modular, expressão (5.8).

$$C^k_{AM-II} = \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{j=1}^{N_{M_i}} VP_i \left(((1 - P^m_{ij}) NII^m_{ij} cm_m) + ((1 - P^e_{ij}) NII^m_{ij} cm_e) + ((1 - P^s_{ij}) NII^s_{ij} cm_s) \right) \quad (5.7)$$

$$C^k_{M-II} = \frac{C^k_{AM-II}}{C^M_{AM-I}} \quad (5.8)$$

Na expressão (5.7), C_{AM-II}^k é o custo absoluto de preparação de interface e montagem das funções internas aos módulos da k -ésima alternativa de arquitetura, N_p é o número de produtos da família, N_{Mi} é o número de módulos do i -ésimo produto da família, VP_i é o volume de montagem do i -ésimo produto, P_{ij}^* é o potencial de integração do j -ésimo módulo do i -ésimo produto, NI_{ij}^* é o número de interfaces internas ao j -ésimo módulo do i -ésimo produto, e cm_* são os custos estimados de montagem (o símbolo '*' pode ser: m para material, e para energia, e s para sinal). C_{M-II}^k é o custo relativo de preparação de interface e montagem intramodular da k -ésima arquitetura e C_{AM-I}^M é o custo de preparação de interface e montagem dos produtos adotando uma arquitetura totalmente modular.

Para ilustrar o uso das expressões (5.7) e (5.8), considere, novamente, a alternativa de arquitetura já utilizada como exemplo nas seções anteriores ($\{f1\ f2\} + \{f3\ f4\ f5\}$). Inspeccionando o modelo funcional dos produtos da família (Figura 5.6), os números de interfaces em cada módulo podem ser obtidos, bem como o número de funções relacionadas às demais (também de cada módulo); estas informações são mostradas no quadro da Figura 5.9.

Módulos	Interfaces Intramodulares			Funções Inter-relacionadas		
	Material	Energia	Sinal	Material	Energia	Sinal
{f1 f2}	-	2	-	-	2	-
{f3 f4 f5}	2	2	-	2	2	-

Figura 5.9 – Relação entre os módulos, suas interfaces internas e as funções inter-relacionadas

O potencial de integração dos dois módulos desta arquitetura específica, utilizando as equações (5.7) e (5.8) e os dados dos quadros das Figuras 5.5 e 5.9, é mostrado no quadro da Figura 5.10. Lembrando que o potencial de integração dos módulos é igual para todos os produtos da família, haja vista que os produtos compartilham o mesmo modelo funcional.

Módulos	Potencial de Integração		
	Material	Energia	Sinal
{f1 f2}	0,000	0,500	0,000
{f3 f4 f5}	0,222	0,222	0,000

Figura 5.10 – Potencial de integração dos módulos

Da aplicação da expressão (5.7) sobre os dados apresentados nos quadros das Figuras 5.5, 5.9 e 5.10, resulta o seguinte custo de preparação de interface e montagem intra módulos dos produtos para a arquitetura proposta:

$$2640=(100+80+60+30)*((1-0,5)*(2*2)+(1-0,222)*(2*3)+(1-0,222)*(2*2))$$

Normalizando este valor (considerando o custo de montagem de 10530 de uma arquitetura totalmente modular) tem-se o custo relativo estimado de montagem intra módulos de 0,2507. A Figura 5.11 ilustra estes custos (losangos vazados) juntamente com os custos de preparação de interface e montagem entre módulos (losangos cheios) na forma gráfica para todas as alternativas de arquiteturas para a família de produtos (a 14^a marca neste gráfico representa a arquitetura do exemplo).

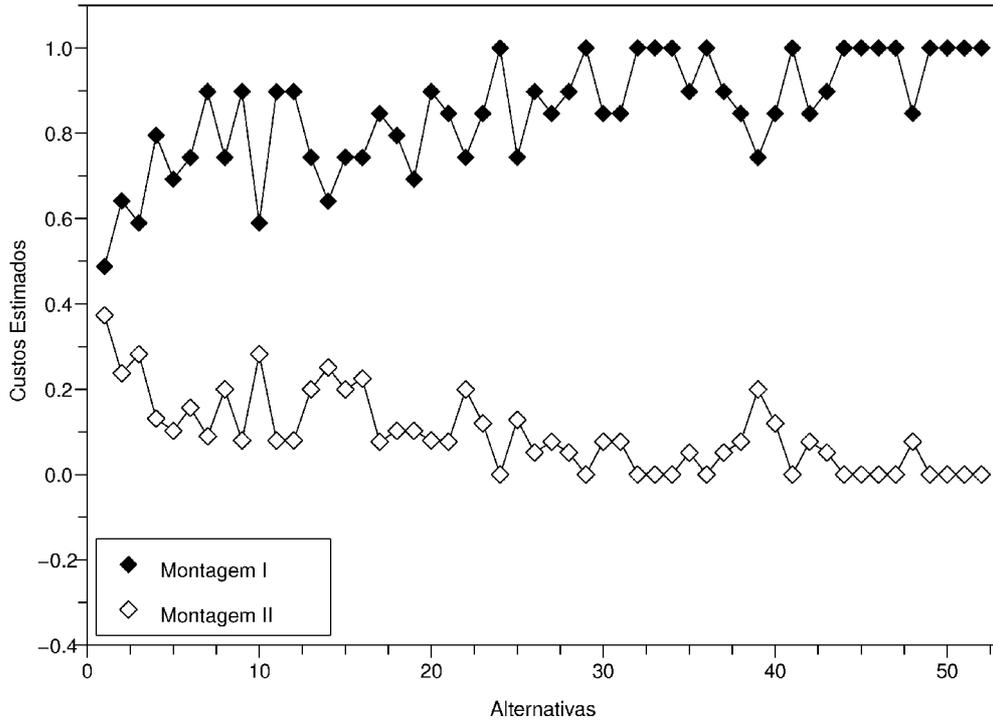


Figura 5.11 – Custos estimados de montagem entre e intra módulos para as alternativas de arquiteturas

A soma dos custos de preparação de interface e montagem entre módulos e intra módulos resulta no custo total de preparação de interface e montagem relativo das alternativas de arquiteturas, a Figura 5.12 apresenta estes custos.

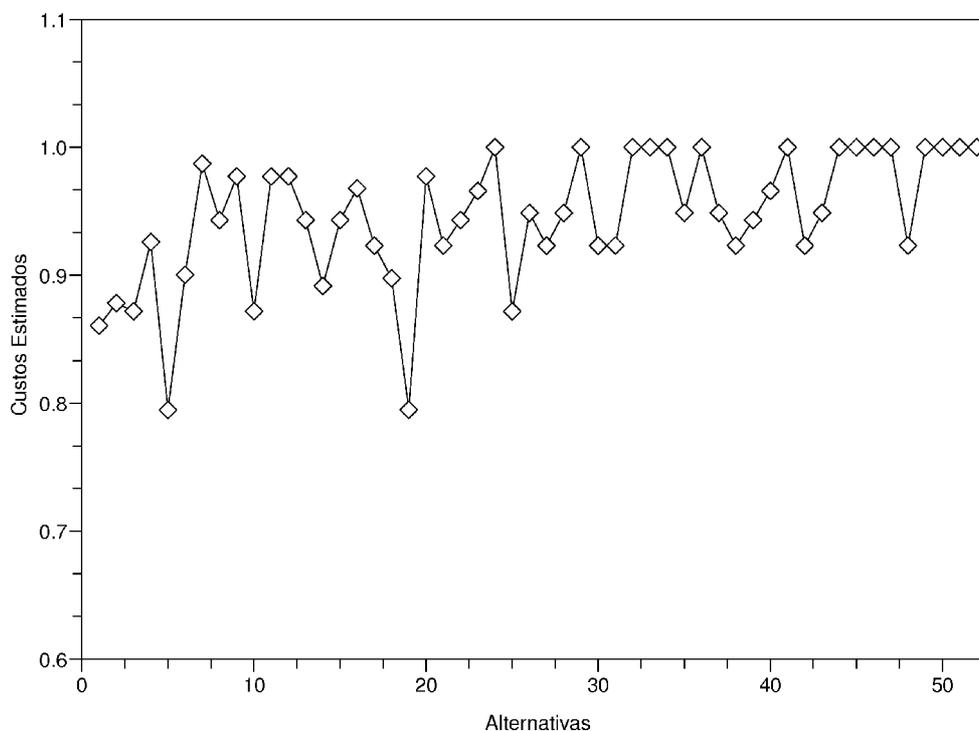


Figura 5.12 – Estimativa dos custos totais de montagem para as diversas alternativas de arquiteturas

5.5 DEFINIÇÃO DA ARQUITUTERA APLICANDO A MÉTRICA DE CUSTOS

Após o cálculo dos custos estimados de desenvolvimento e de preparação de interface e montagem, pode-se escolher uma arquitetura para a família de produtos. A melhor arquitetura, admite-se, é aquela que resultar no menor custo estimado para a família de produtos. Antes, porém, deve-se escolher pesos para os coeficientes α e β que representam a estrutura de custos do fabricante para o desenvolvimento e a preparação de interfaces e montagem dos produtos.

Na Figura 5.13 são apresentadas as curvas das estimativas de custos totais para várias combinações de α e β para os dados do exemplo mostrado nas seções anteriores. Quando α é igual à unidade e β é igual a zero, tem-se a curva definida pelos losangos vazados (neste caso apenas os custos de desenvolvimento são importantes). Quando α é zero e β é igual à

unidade, tem-se a curva definida pelos losangos cheios (neste caso apenas os custos de preparação de interface e montagem são importantes). As curvas definidas entre estes limites dependem da escolha dos coeficientes α e β . Na Figura 5.13 foram utilizados quatro pares para estes coeficientes 0,2-0,8; 0,4-0,6; 0,6-0,4; e 0,8-0,2 (para α e β , respectivamente).

A escolha dos coeficientes depende, como dito, da estrutura de custos do fabricante. Genericamente pode-se assumir valores maiores de α (em relação a β) para casos de famílias de muitos produtos e baixo volume de produção e valores maiores de β (em relação a α) para casos de famílias de poucos produtos e grande volume de produção. Assumindo, neste exemplo de aplicação da métrica, α igual a 0,3 e β igual a 0,7, a melhor alternativa de arquitetura é a que define os seguintes agrupamentos funcionais {f1}+{f2 f3 f4}+{f5} (19ª alternativa de arquitetura no gráfico da Figura 5.12).

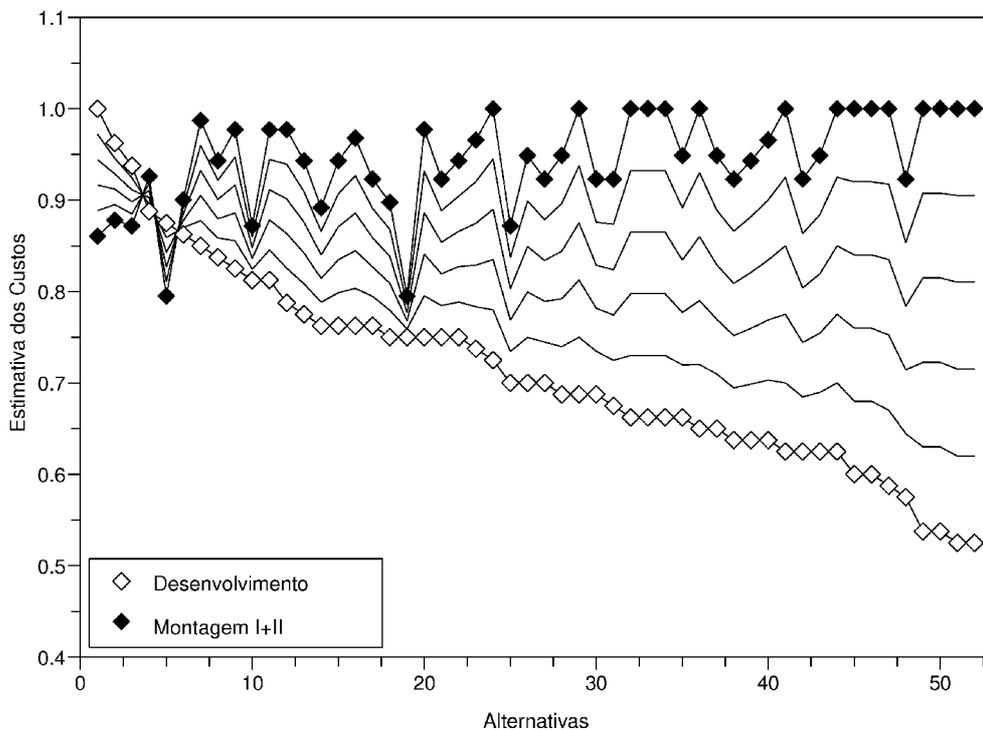


Figura 5.13 – Variação do custo total em função de α e β para as alternativas de arquitetura

Os agrupamentos funcionais (módulos) sugeridos após a aplicação da métrica de custos são ilustrados na Figura 5.14. O módulo que executa a função 1 é único para os quatro produtos da família. O módulo que executa as funções 2, 3 e 4 necessita de 4 variações para atender os quatro produtos da família (as três funções deste agrupamento apresentam trocas de material entre si, sugerindo potencial para integração e conseqüente redução dos custos de preparação de interface e montagem). Já o módulo que executa a função 5 necessita de 3 variações para gerar a variedade de oferta desejada.

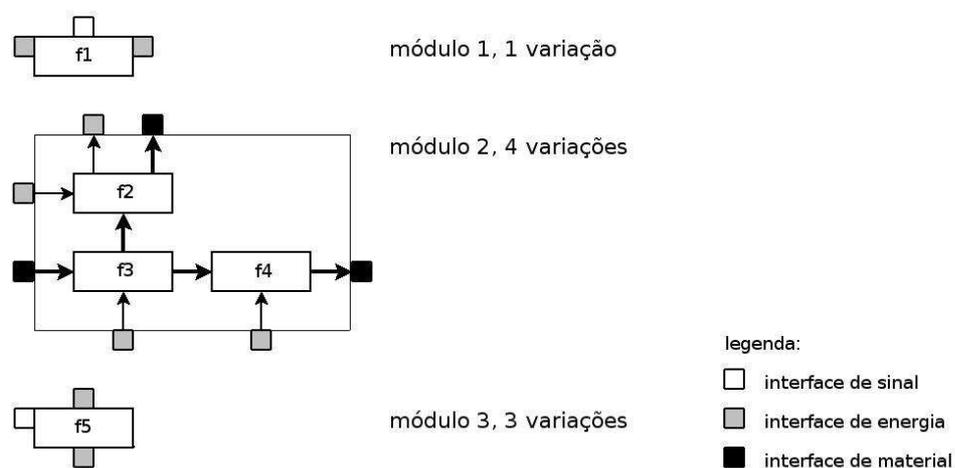


Figura 5.14 – Módulos sugeridos para a família de produtos

A alternativa de arquitetura de enfoque modular sugerida pela aplicação da métrica proposta para a família de produtos utilizada como exemplo com α igual a 0,3 e β igual a 0,7 resulta em:

- Custo total estimado, relativo às demais arquiteturas, da alternativa sugerida e ilustrada na Figura 5.13 de 0,78141, o menor entre as 52 alternativas de arquitetura de enfoque modular possíveis para produtos que executam 5 funções (o custo estimado é composto, como proposto, pelos custos de desenvolvimento e preparação de interface e montagem);
- Custo de desenvolvimento desta alternativa de arquitetura para a família de produtos de 75% do que seria o custo de desenvolvimento dos quatro produtos segundo uma

arquitetura totalmente integral;

- Custo de preparação e montagem estimado das interfaces entre módulos para a arquitetura sugerida de 69% do que seria o custo de montagem destes produtos segundo uma arquitetura totalmente modular.
- Custo de preparação e montagem estimado das interfaces intra módulos (no caso apenas do módulo 2) de 10% do que seria o custo de montagem dos produtos segundo uma arquitetura, novamente, totalmente modular.

5.6 REPRESENTAÇÃO DAS INTERAÇÕES FUNCIONAIS

Além da descrição dos integrantes da família de produtos segundo suas variações funcionais, são utilizadas nesta tese informações de interação entre as funções dos produtos, como visto nas seções anteriores. Para formalizar estas informações de interação, utilizam-se variações da *Design Structure Matrix* para descrever as interações entre as funções do produto em termos de material, energia e sinal. Para ilustrar a maneira como serão descritas as interações nesta tese, considere um produto (sistema) formado de cinco funções (f1, f2, f3, f4 e f5) arranjado conforme a Estrutura de Funções da Figura 5.6. A linha cheia larga identifica fluxo de material, a linha cheia fina representa fluxo de energia e a linha tracejada fluxo de informação; o retângulo tracejado representa a fronteira do sistema (fs). As interações dinâmicas entre os elementos funcionais ilustrados na Figura 5.6 são representados matricialmente nos quadros da Figuras 5.15, 5.16 e 5.17. O quadro da Figura 5.15 representa as trocas de material entre as funções, o quadro da Figura 5.16 representa as trocas de energia e, por fim, as trocas de sinal entre as funções estão representadas pelo quadro da Figura 5.17.

	f1	f2	f3	f4	f5	fs
f1	1	0	0	0	0	0
f2	0	1	1	0	0	1
f3	0	1	1	1	0	1
f4	0	0	1	1	0	1
f5	0	0	0	0	1	0
fs	0	1	1	1	0	1

Figura 5.15 – Interação dinâmica entre os elementos funcionais (material)

	f1	f2	f3	f4	f5	fs
f1	1	1	0	0	0	1
f2	1	1	0	0	0	1
f3	0	0	1	0	1	0
f4	0	0	0	1	0	1
f5	0	0	1	0	1	1
fs	1	1	0	1	1	1

Figura 5.16 – Interação dinâmica entre os elementos funcionais (energia)

	f1	f2	f3	f4	f5	fs
f1	1	0	0	0	0	1
f2	0	1	0	0	0	0
f3	0	0	1	0	0	0
f4	0	0	0	1	0	0
f5	0	0	0	0	1	1
fs	1	0	0	0	1	1

Figura 5.17 – Interação dinâmica entre os elementos funcionais (sinal)

5.7 TRATAMENTO DAS INFORMAÇÕES FUNCIONAIS

Nesta seção são descritos os procedimentos de cálculo aplicados sobre as informações funcionais da família de produtos que são utilizados posteriormente na automatização do cálculo da métrica de custo relativo das alternativas de arquiteturas de enfoque modular. O primeiro procedimento descrito utiliza as informações de variações funcionais de cada integrante da família para definir o número de variações de um determinado agrupamento funcional (módulo) para geração de todos os integrantes da família de produtos. A aplicação do segundo procedimento descrito nesta seção resulta no número de interfaces inter módulos e intra módulos de uma alternativa específica de arquitetura de enfoque modular da família de produtos, cálculo que também deve ser automatizado.

5.7.1 Cálculo do Número de Variações Modulares

Esta seção apresenta um procedimento para o cálculo do número de variações de um determinado agrupamento funcional para que sejam geradas todos os integrantes de uma família de produtos. No procedimento proposto, utilizam-se as informações provenientes de uma matriz com as descrições funcionais dos integrantes da família de produtos, matriz semelhante àquela apresentada no quadro da Figura 5.1. Por exemplo, supondo uma família de quatro produtos e definida por cinco funções, a mesma já utilizada como exemplo nas seções anteriores, deseja-se conhecer qual o número de variações de um agrupamento hipotético das funções 2 e 3 para gerar a família desejada. Neste exemplo, cada integrante da família é formado com as seguintes variações para o agrupamento funcional sugerido:

- o produto 1 é formado pela variação 1 da função 1 e pela variação 1 da função 2;
- o produto 2 é formado pela variação 1 da função 1 e pela variação 1 da função 2;
- o produto 3 é formado pela variação 1 da função 1 e pela variação 3 da função 2; e
- o produto 4 é formado pela variação 1 da função 1 e pela variação 2 da função 2;

A matriz formada no procedimento proposto considera apenas as funções do agrupamento funcional sob avaliação. Os termos desta matriz são definidos por comparação entre as variações de formação dos agrupamentos funcionais dos integrantes da família de produtos da

seguinte maneira:

- o termo ij desta matriz compara a composição do agrupamento funcional para os produtos i e j – para $j > i$;
- se os agrupamentos funcionais são formados por diferentes variações funcionais, o elemento ij da matriz é 1, caso contrário é 0;
- todos os demais termos da matriz são 0.

Para o exemplo em questão e seguindo o procedimento proposto, esta matriz é ilustrada pela matriz (5.9). Nesta matriz, a título de ilustração, seu elemento 23 é obtido da comparação das variações do agrupamento funcional para os produtos 2 e 3. Como o agrupamento funcional do produto 2 é diferente do produto 3, o elemento é igual a 1.

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

O número de variações necessárias do agrupamento funcional investigado para gerar os integrantes da família de produtos desejada é igual a 1 mais a soma do número de colunas em que todos os termos acima da diagonal principal é igual a 1. Na matriz (5.9), duas colunas apresentam todos os termos acima da diagonal principal igual a 1, portanto o número de variações deste agrupamento funcional para formar os integrantes desejados da família de produtos é 3.

5.7.2 Cálculo do Número de Interfaces de um Agrupamento Funcional

O uso das expressões (5.7) e (5.8) admite que sejam conhecidos o número de interfaces entre as funções de um agrupamento funcional particular (módulo) e entre os módulos formados. Nesta seção um procedimento de automação do cálculo do número destas interfaces é proposto. Para tanto, considere a matriz (5.10), $[M_I]$, e o vetor (5.11), $\{C_M\}$. $[M_I]$ é a matriz

que representa as interações (material, energia ou sinal) das funções de um produto e $\{C_M\}$ é o vetor representando as funções presentes em um determinado agrupamento funcional (1: função presente, 0: função ausente).

$$[M_I] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

$$\{C_M\}^T = \{01100\} \quad (5.11)$$

A multiplicação entre $[M_I]$ e $\{C_M\}$ resulta num vetor que contém as informações desejadas tanto do número de interfaces entre o agrupamento funcional e as demais funções do produto como o número de interfaces entre as funções do agrupamento. Porém, estas informações devem ser separadas, haja vista que estão misturadas no vetor.

Um ruído presente na multiplicação sugerida é a interação de uma função com ela mesma. Para expurgar esta informação indesejada, deve-se diminuir do resultado da multiplicação $[M_I]\{C_M\}$, o vetor $\{C_M\}$, igualdade (5.12).

$$[M_I]\{C_M\} - \{C_M\} = \{C_T\} \quad (5.12)$$

O vetor $\{C_M\}$ contém informações do número de interfaces intra módulo e externas ao módulo. Para se obter o número de interfaces internas ao módulo, deve-se aplicar novo filtro. A multiplicação dos vetores $\{C_M\}$ e $\{C_T\}$ de acordo com a expressão (5.13), resulta no número de interfaces entre as funções do agrupamento, I_b , vezes 2.

$$\{C_M\}^T \{C_T\} = 2 \cdot I_I \quad (5.13)$$

Para calcular o número de interfaces entre determinado agrupamento funcional (módulo) e as demais funções do produto utiliza-se, novamente, as informações do vetor $\{C_T\}$. A soma dos elementos deste vetor é o número total de interfaces entre as funções (número de interfaces internas vezes 2 mais número de interfaces externas). Logo diminui-se da soma dos elementos do vetor $\{C_T\}$ um dos lados da igualdade (5.13). A expressão (5.14), ilustra a operação sugerida, cujo resultado é o número de interfaces entre o agrupamento e as demais funções do produto, I_E .

$$I_E = Soma(\{C_T\}) - \{C_M\}^T \{C_T\} \quad (5.14)$$

Para ilustrar a aplicação das equações (5.12), (5.13) e (5.14), considere o sistema (5.10) e agrupamento (5.11) ilustrados no início da seção. Utilizando estas informações, pode-se obter o vetor $\{C_T\}$ ilustrado em (5.15), assim como o número de interfaces internas ao agrupamento (5.16) e no número de interfaces externas ao agrupamento funcional (5.17).

$$\{C_T\}^T = \{1 \ 1 \ 1 \ 1\} \quad (5.15)$$

$$I_I = 1 \quad (5.16)$$

$$I_E = 3 \quad (5.17)$$

5.7.3 Automatização do Cálculo do Número de Interfaces

A aplicação do procedimento de cálculo do número das interfaces internas e externas aos módulos propostos na seção anterior é ilustrado nesta seção. As expressões (5.12), (5.13) e

(5.14), assim como o modelo de produto ilustrado na Figura 5.6 e nos quadros das Figuras 5.15, 5.16 e 5.17 são utilizados neste exemplo. A aplicação destas expressões sobre o modelo de produto resulta nas informações sobre o número de interfaces mostradas no quadro da Figura 5.18. Neste quadro são detalhadas as 52 alternativas possíveis de arquitetura possíveis para um produto que executa 5 funções. Os números de interfaces são exclusivos para o modelo da Figura 5.6. No quadro da Figura 5.18, os módulos são formados por agrupamentos com os tamanhos indicados na coluna Módulos. Cada número desta coluna indica que um módulo é formado. Cada agrupamento é definido seguindo a ordem das funções indicado na coluna Ordem das Funções. Para cada módulo sugerido de uma alternativa de arquitetura, são mostrados o número de interfaces internas ao módulo na coluna Interfaces Internas e o número de interfaces externas ao módulo na coluna Interfaces Externas. Por exemplo, na primeira linha do quadro da Figura 5.18 tem-se uma arquitetura definida por 2 módulos: {f1} e {f2 f3 f4 f5}. O primeiro módulo não tem interfaces internas (apenas uma função), mas tem 3 interfaces com o restante do produto (segundo módulo e fronteira do sistema). O segundo módulo tem 6 interfaces internas e 8 interfaces com o restante do produto (primeiro módulo e fronteira do sistema).

Opções	Ordem das Funções					Módulos					Interfaces Internas					Interfaces Externas				
	1	2	3	4	5	1	4	0	0	0	0	6	0	0	0	3	8	0	0	0
1	1	2	3	4	5	1	1	3	0	0	0	0	4	0	0	3	4	6	0	0
2	1	3	2	4	5	1	1	3	0	0	0	0	0	0	3	4	10	0	0	
3	1	4	2	3	5	1	1	3	0	0	0	4	0	0	3	3	7	0	0	
4	1	5	2	3	4	1	1	3	0	0	0	4	0	0	3	3	7	0	0	
5	2	1	3	4	5	1	4	0	0	0	0	4	0	0	4	9	0	0	0	
6	2	3	1	4	5	1	1	3	0	0	0	0	0	0	4	4	9	0	0	
7	2	4	1	3	5	1	1	3	0	0	0	0	2	0	4	3	8	0	0	
8	2	5	1	3	4	1	1	3	0	0	0	0	2	0	4	3	8	0	0	
9	3	1	2	4	5	1	4	0	0	0	0	2	0	0	4	11	0	0	0	
10	3	4	1	2	5	1	1	3	0	0	0	0	2	0	4	3	8	0	0	
11	3	5	1	2	4	1	1	3	0	0	0	0	2	0	4	3	8	0	0	
12	4	1	2	3	5	1	4	0	0	0	0	6	0	0	3	8	0	0	0	
13	4	5	1	2	3	1	1	3	0	0	0	0	4	0	3	3	7	0	0	
14	5	1	2	3	4	1	4	0	0	0	0	6	0	0	3	8	0	0	0	
15	1	2	3	4	5	2	3	0	0	0	2	4	0	0	5	6	0	0	0	
16	1	2	3	4	5	2	1	2	0	0	2	0	0	0	5	4	6	0	0	
17	1	2	4	3	5	2	1	2	0	0	2	0	2	0	5	3	5	0	0	
18	1	2	5	3	4	2	1	2	0	0	2	0	2	0	5	3	5	0	0	
19	1	2	3	4	5	2	1	1	1	0	2	0	0	0	5	4	3	3	0	
20	1	3	2	4	5	2	3	0	0	0	0	0	0	0	7	10	0	0	0	
21	1	3	2	4	5	2	1	2	0	0	0	0	0	0	7	4	6	0	0	
22	1	3	4	2	5	2	1	2	0	0	0	0	0	0	7	3	7	0	0	
23	1	3	5	2	4	2	1	2	0	0	0	0	0	0	7	3	7	0	0	
24	1	3	2	4	5	2	1	1	1	0	0	0	0	0	7	4	3	3	0	
25	1	4	2	3	5	2	3	0	0	0	0	4	0	0	6	7	0	0	0	
26	1	4	2	3	5	2	1	2	0	0	0	0	2	0	6	4	5	0	0	
27	1	4	3	2	5	2	1	2	0	0	0	0	0	0	6	4	7	0	0	
28	1	4	5	2	3	2	1	2	0	0	0	0	2	0	6	3	6	0	0	
29	1	4	2	3	5	2	1	1	1	0	0	0	0	0	6	4	4	3	0	
30	1	5	2	3	4	2	3	0	0	0	0	4	0	0	6	7	0	0	0	
31	1	5	2	3	4	2	1	2	0	0	0	0	2	0	6	4	5	0	0	
32	1	5	3	2	4	2	1	2	0	0	0	0	0	0	6	4	7	0	0	
33	1	5	4	2	3	2	1	2	0	0	0	0	2	0	6	3	6	0	0	
34	1	5	2	3	4	2	1	1	1	0	0	0	0	0	6	4	4	3	0	
35	2	3	1	4	5	2	3	0	0	0	2	0	0	0	6	9	0	0	0	
36	2	3	1	4	5	2	1	2	0	0	2	0	0	0	6	3	6	0	0	
37	2	3	1	4	5	2	1	1	1	0	2	0	0	0	6	3	3	3	0	
38	2	4	1	3	5	2	3	0	0	0	0	2	0	0	7	8	0	0	0	
39	2	4	1	3	5	2	1	2	0	0	0	0	2	0	7	3	5	0	0	
40	2	4	1	3	5	2	1	1	1	0	0	0	0	0	7	3	4	3	0	
41	2	5	1	3	4	2	3	0	0	0	0	2	0	0	7	8	0	0	0	
42	2	5	1	3	4	2	1	2	0	0	0	0	2	0	7	3	5	0	0	
43	2	5	1	3	4	2	1	1	1	0	0	0	0	0	7	3	4	3	0	
44	3	4	1	2	5	2	3	0	0	0	2	2	0	0	5	8	0	0	0	
45	3	4	1	2	5	2	1	1	1	0	2	0	0	0	5	3	4	3	0	
46	3	5	1	2	4	2	3	0	0	0	2	2	0	0	5	8	0	0	0	
47	3	5	1	2	4	2	1	1	1	0	2	0	0	0	5	3	4	3	0	
48	4	5	1	2	3	2	3	0	0	0	0	4	0	0	6	7	0	0	0	
49	4	5	1	2	3	2	1	1	1	0	0	0	0	0	6	3	4	4	0	
50	1	2	3	4	5	5	0	0	0	0	8	0	0	0	9	0	0	0	0	
51	1	2	3	4	5	1	1	1	1	1	0	0	0	0	3	4	4	3	3	

Figura 5.18 – Alternativas de arquitetura e número de interfaces intra e inter módulos

5.8 OS ALGORITMOS GENÉTICOS NA DEFINIÇÃO DA ARQUITETURA

Esta seção é dedicada à descrição da aplicação dos Algoritmos Genéticos ao processo de escolha da arquitetura de enfoque modular para uma família de produtos. Os passos sugeridos na aplicação desta ferramenta evolutiva estão sumarizados na Figura 5.19. Nesta figura, estão ilustrados os fluxos de informação sugeridos para que, ao final do processo, uma arquitetura de baixo custo de desenvolvimento e produção seja definida para a família de produtos. As informações necessárias para o início do processo de busca desta arquitetura utilizando os Algoritmos Genéticos são: modelos funcionais sistêmicos dos produtos da família (tipo DSM, vide quadros das Figuras 5.15, 5.16 e 5.17); informações sobre a família de produtos (variações funcionais de cada produto da família, vide quadro da Figura 5.1); e as estimativas dos custos de desenvolvimento das funções e suas variantes, quadro da Figura 5.2, e dos custos de preparação e montagem das interfaces de material, energia e sinal, vide quadro da Figura 5.5. Também são necessárias para a aplicação sugerida dos Algoritmos Genéticos as informações de controle de fluxo do processo evolutivo. Estas informações controlam a taxa de renovação da população, o método de seleção, e a taxa de mutação da população.

Conhecidas as informações necessárias para o início do processo evolutivo, é gerada uma população aleatória de arquiteturas para a família de produtos. Esta população evolui com as operações de seleção, cruzamentos e mutações ao longo das gerações. Três passos do processo evolutivo são críticos para a evolução das alternativas de arquiteturas para a família de produtos: a codificação das alternativas, os cruzamentos, e as mutações sofridas pelos indivíduos da população. As subseções seguintes apresentam as propostas para cada um destes passos e, também, uma aplicação do algoritmo sobre um problema de solução (imaginada) conhecida para verificar a convergência do algoritmo para alternativas de arquiteturas de baixo custo.

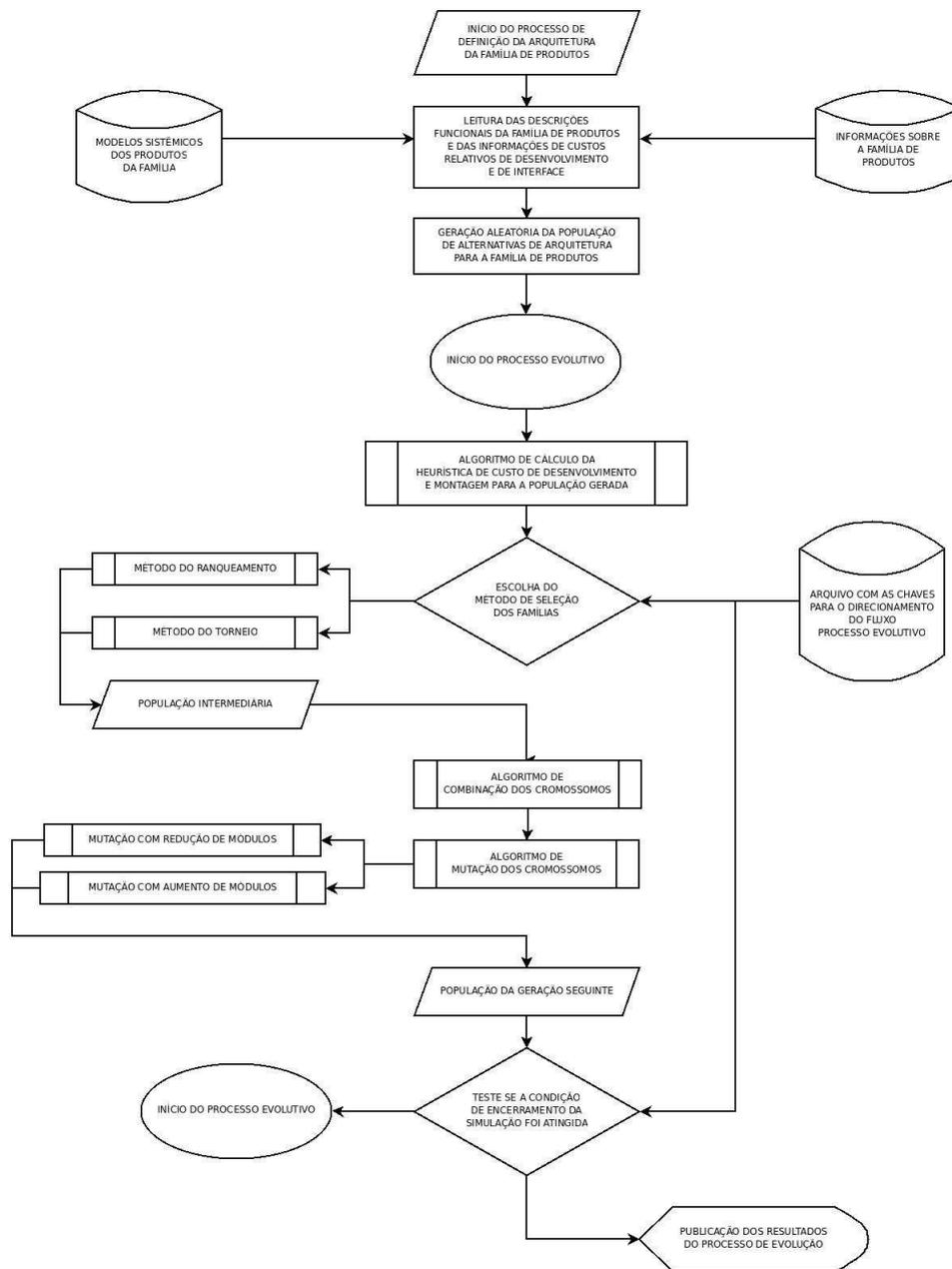


Figura 5.19 – Fluxograma da aplicação dos Algoritmos Genéticos à definição da arquitetura de uma família de produtos

5.8.1 Codificação dos Cromossomos

A codificação das alternativas de arquiteturas de famílias de produtos depende do número de funções executadas pelos seus integrantes e como estas funções são agrupadas. Neste trabalho cada função da família de produtos é representada por um número inteiro que pode variar de 1 até o número de funções da família. Estas funções, representadas por números inteiros, são, então, dispostas aleatoriamente em um vetor de ordem igual ao número de funções da família. Para uma família de produtos que executam 10 funções, um vetor como proposto neste parágrafo é ilustrado em (5.18).

$$F^T = \{7 \ 4 \ 2 \ 5 \ 9 \ 1 \ 10 \ 8 \ 3 \ 6\} \quad (5.18)$$

Uma arquitetura de enfoque modular particular para uma família de produtos formada por um certo número de funções depende de como os agrupamentos funcionais são definidos. Como visto, as alternativas de arquiteturas de enfoque modular são limitadas em seus extremos pelas arquiteturas totalmente modular e totalmente integral. A alternativa de arquitetura totalmente integral presume a existência de apenas um agrupamento funcional, ou seja, todas as funções da família formam um único módulo e são desenvolvidas conjuntamente (abordagem integral). Por outro lado, na alternativa totalmente modular cada função da família é desenvolvida em módulos distintos. Considerando as muitas possibilidades de arquiteturas de enfoque modular para a família de produtos, propõe-se que uma alternativa específica de arquitetura de enfoque modular seja definida pelo vetor de funções já apresentado, (5.18), mais um vetor que represente como as funções serão agrupadas. Este vetor deve ter ordem igual ao número de funções da família de produtos mais 1. O último elemento do vetor guarda a informação do número de agrupamentos funcionais da alternativa de arquitetura. Os elementos de 1 até o número de agrupamentos funcionais da alternativa de arquitetura são preenchidos com o número de funções de cada agrupamento. Os demais elementos partindo do número de agrupamentos da família mais 1 até o número de funções da família são preenchidos com zeros.

Para ilustrar o vetor que define a formação dos agrupamentos funcionais de uma alternativa

de arquitetura de enfoque modular, utiliza-se, como exemplo, uma família que executa 10 funções – portanto, o vetor dos agrupamentos funcionais deve ter ordem 11. O décimo primeiro elemento deste vetor é preenchido com o número de agrupamentos da alternativa, por exemplo 4 módulos. Os quatro primeiros elementos do vetor representam o tamanho dos quatro agrupamentos funcionais desta alternativa de arquitetura de enfoque modular. Estes elementos podem assumir, entre muitas possibilidades, os tamanhos de agrupamentos 3, 1, 4 e 2 – os demais elementos do vetor são assinalados com zeros (a soma dos elementos do vetor, exceção ao último elemento, deve ser igual ao número de funções da família de produtos). O vetor que define os agrupamentos funcionais desta alternativa de arquitetura é ilustrado em (5.19).

$$M^T = \{3 \ 1 \ 4 \ 2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 4\} \quad (5.19)$$

A combinação deste vetor, (5.19), que define aleatoriamente uma alternativa dos agrupamentos funcionais de uma família de produtos, com o vetor que contém todas as funções da família, (5.18), também ordenadas aleatoriamente resulta, de acordo com esta proposta, numa alternativa única de arquitetura de enfoque modular para a família. Segundo esta proposta de geração de uma alternativa de enfoque modular, os agrupamentos funcionais da alternativa de arquitetura definida pelos vetores ilustrados são obtidos seqüencialmente sobre o vetor representativo das funções da família. Logo a alternativa de arquitetura definida por estes vetores define os seguintes agrupamentos de funções (módulos): $\{f_7 \ f_4 \ f_2\} + \{f_5\} + \{f_9 \ f_1 \ f_{10} \ f_8\} + \{f_3 \ f_6\}$.

A partir da definição da codificação dos cromossomos que representam alternativas de arquiteturas de enfoque modular para a família de produtos, pode-se gerar uma população para iniciar o processo evolutivo. Os vetores definidos nos parágrafos anteriores podem ser colocados ao lado de vetores que representem outras alternativas de arquitetura e, desta forma, utilizando o conceito de matrizes para representar uma população de alternativas de arquiteturas de enfoque modular. A primeira matriz, (5.20), é construída posicionando lado a lado os vetores que definem os agrupamentos funcionais, matriz $[M]$. A segunda matriz,

(5.21), é formada com o posicionando os vetores que representam as funções lado a lado, matriz [F].

Para ilustrar a criação de uma população de alternativas de arquiteturas de enfoque modular para a família de produtos, são apresentados exemplos das matrizes [M] e [F]. A população ilustrada é composta de dez alternativas de arquiteturas de enfoque modular para uma família de produtos que executam 10 funções. Esta população foi gerada de forma aleatória. O décimo indivíduo desta população de alternativas de arquiteturas para a família de produtos é definido pelas décimas colunas das duas matrizes, e esta arquitetura de enfoque modular específica sugere cinco agrupamentos funcionais: {f7 f2 f5 f6}+{f3 f10 f8}+{f4}+{f1}+{f9}.

$$[M] = \begin{bmatrix} 4 & 1 & 3 & 4 & 3 & 3 & 2 & 5 & 1 & 4 \\ 1 & 4 & 6 & 2 & 2 & 1 & 4 & 1 & 1 & 3 \\ 3 & 1 & 1 & 4 & 1 & 1 & 4 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 4 & 0 & 3 & 5 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 6 & 3 & 3 & 7 & 5 & 3 & 4 & 6 & 5 \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

$$[F] = \begin{bmatrix} 4 & 1 & 10 & 5 & 6 & 5 & 7 & 8 & 3 & 7 \\ 9 & 7 & 7 & 10 & 4 & 2 & 8 & 5 & 10 & 2 \\ 3 & 2 & 1 & 8 & 1 & 7 & 6 & 7 & 4 & 5 \\ 2 & 4 & 4 & 6 & 8 & 6 & 10 & 6 & 6 & 6 \\ 10 & 10 & 2 & 9 & 10 & 3 & 3 & 2 & 8 & 3 \\ 7 & 8 & 3 & 1 & 2 & 4 & 2 & 4 & 2 & 10 \\ 1 & 6 & 8 & 7 & 5 & 9 & 4 & 1 & 7 & 8 \\ 6 & 3 & 9 & 2 & 9 & 8 & 9 & 3 & 9 & 4 \\ 5 & 9 & 6 & 4 & 3 & 10 & 1 & 9 & 5 & 1 \\ 8 & 5 & 5 & 3 & 7 & 1 & 5 & 10 & 1 & 9 \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

Uma população de alternativas de arquitetura de enfoque modular para a família de produtos formada de acordo com a lógica apresentada nesta seção é a primeira geração das alternativas de arquiteturas de enfoque modular que devem evoluir para uma arquitetura de baixo custo à medida que as gerações subseqüentes sejam formadas. É fundamental para a formação das novas gerações de populações de alternativas de arquiteturas de enfoque modular as definições das operações de cruzamentos e mutações entre os indivíduos da população que são apresentadas nas subseções seguintes.

5.8.2 Combinação dos Cromossomos

Durante a evolução, os cruzamentos entre os indivíduos mais aptos de uma geração formam os indivíduos da geração seguinte. Os cromossomos de cada indivíduo de uma população representam alternativas de arquiteturas de enfoque modular para a família de produtos. Estes cromossomos, como visto na seção anterior, são definidos por dois vetores: um deles contendo as funções da família de produtos e o outro contendo uma alternativa de agrupamentos funcionais. Os cromossomos representados desta maneira devem ser combinados para formar novos indivíduos.

A combinação dos cromossomos adotada para a formação de novos indivíduos da população de alternativas de arquiteturas de enfoque modular é a herança completa dos vetores com as informações de posição das funções e dos agrupamentos funcionais dos pais. Ou seja, para dois cromossomos aptos para o cruzamento, o indivíduo criado deste cruzamento herda de um dos genitores as informações sobre a posição das funções, (5.18), e do outro genitor as informações sobre a formação dos agrupamentos funcionais, (5.19).

Para ilustrar esta proposta de combinação dos indivíduos, considere os dois cromossomos mostrados à esquerda da Figura 5.20, que foram selecionados para o cruzamento. Duas possibilidades de combinações destes cromossomos podem ser obtidas a partir destes genitores. As duas alternativas são mostradas à direita da Figura 5.20. A primeira alternativa combina o vetor com as informações das funções da família de um genitor com a sugestão de agrupamento funcional do segundo genitor, a segunda alternativa faz a mesma combinação em ordem inversa entre os genitores. A decisão de qual será o genitor que contribuirá com as

informações sobre as funções da família e qual contribuirá com a sugestão de agrupamentos funcionais é aleatória.

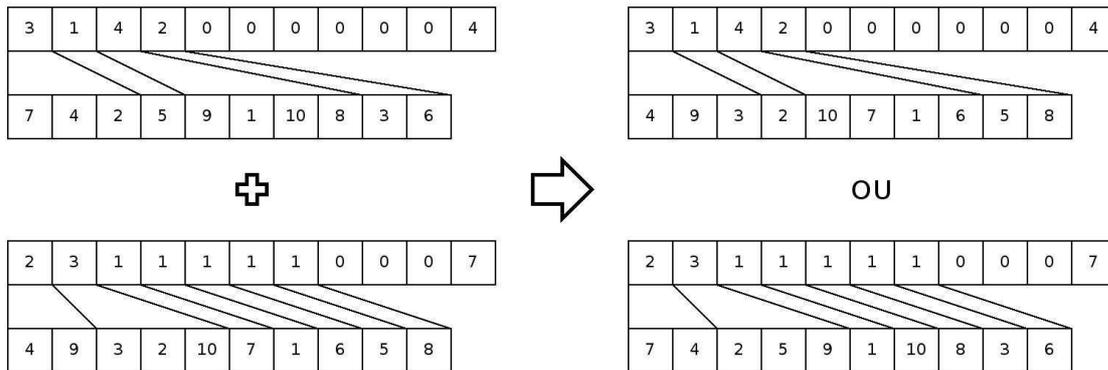


Figura 5.20 – Combinação de dois cromossomos genitores para a formação de nova geração

Os cromossomos obtidos de acordo com esta regra de cruzamentos preservam muita informação dos cromossomos genitores. Estas informações são preservadas devido tanto a característica permutatória do vetor das funções da família de produtos como a restrição à formação dos agrupamentos funcionais (a soma dos agrupamentos sugeridos não pode exceder o número de funções da família). Estas características impossibilitam a adoção de vários pontos de combinação e limitam a geração de cromossomos diferenciados à população.

5.8.3 Mutação dos Cromossomos

As mutações dos cromossomos permitem que sejam gerados indivíduos não presentes nas populações originais, podendo enriquecer sua diversidade genética. Para o caso específico dos cromossomos que representam alternativas de arquiteturas de enfoque modular, são propostos 4 tipos de mutação, divididos em 2 grupos. No primeiro grupo das mutações estão as permutações de ordem, tanto do vetor das funções, (5.18), como do vetor dos módulos (agrupamentos funcionais), (5.19). Nestas mutações, a simples permuta dos elementos dos vetores gera cromossomos que representam alternativas novas de arquitetura de enfoque modular para a família de produtos. No segundo grupo estão as mutações de cisão ou aglutinação de módulos, que ocorrem apenas no vetor dos agrupamentos funcionais, (5.19).

Estas mutações, explicadas adiante, são ilustradas nas Figuras 5.21 e 5.22, .

O primeiro grupo de mutações é ilustrado pela Figura 5.21. Nesta figura o cromossomo original é colocado à esquerda da figura e os cromossomos alterados são colocados à direita da figura. A primeira mutação deste exemplo é o resultado da permutação de dois elementos do vetor que define os agrupamentos funcionais, (5.19), da alternativa de arquitetura. No exemplo considerado o segundo e o quarto agrupamentos alteram suas posições, gerando um novo cromossomo. Na segunda mutação o terceiro e o sétimo termos (escolhidos aleatoriamente) do vetor das posições das funções, (5.18), são permutados, gerando um novo cromossomo. Se uma destas mutações ocorre sobre um cromossomo específico, ela pode ocorrer um número de vezes aleatório que varia entre 1 e o número de funções da família.

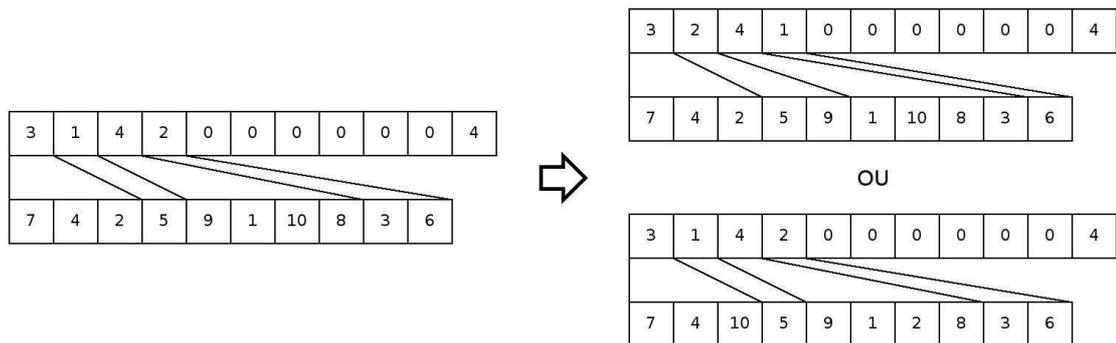


Figura 5.21 – Opções de mutação de um cromossomo por permutação

O terceiro e quarto tipos de mutação estão restritos ao vetor que define os agrupamentos funcionais, (5.19), da família de produtos. As possibilidades de mutação sobre este vetor são: aglutinação de dois agrupamentos funcionais ou a cisão de um agrupamento em dois (de tamanhos aleatórios). Estas mutações são ilustradas na Figura 5.22. Para ilustrar a mutação de um cromossomo, colocado à esquerda da figura, devido à aglutinação de dois módulos, considere o cromossomo colocado à direita e na porção superior da figura. Este cromossomo foi resultado da aglutinação do primeiro e do quarto agrupamentos funcionais (escolhidos de forma aleatória) do cromossomo original. Esta aglutinação reposiciona os elementos do vetor com as funções da família e reduz o número de agrupamentos do cromossomo para 3. Outra alternativa de mutação é a cisão de um agrupamento funcional em dois (de tamanhos

aleatórios). No caso ilustrado pelo cromossomo colocado à direita e na porção inferior da Figura 5.22, o terceiro agrupamento foi particionado em dois: um definido por uma função e outro formado de três funções; um deles permaneceu na mesma posição e o novo agrupamento criado foi posicionado logo a seguir no vetor que define os agrupamentos funcionais. Os demais agrupamentos foram deslocados de uma posição e o número total de agrupamentos foi alterado para o número original do cromossomo mais 1.

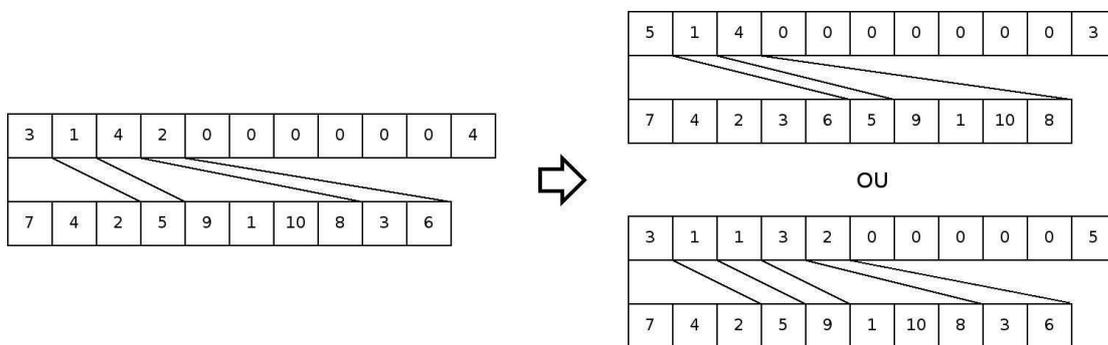


Figura 5.22 – Opções de mutação de um cromossomo por aglutinação ou cisão dos agrupamentos funcionais

5.9 TESTE DA MÉTRICA E DO PROCESSO EVOLUTIVO

Nesta seção são apresentados o teste proposto para a validação da métrica de auxílio à definição da arquitetura de enfoque modular para famílias de produtos e do processo evolutivo, assim como os resultados esperados e obtidos. O teste de validação da métrica e do processo evolutivo é aplicado sobre uma família de produtos de características particulares. As características desejáveis de um modelo funcional, comum aos integrantes de uma família de produtos, que possa ser empregado para o teste da métrica é apresentado na próxima seção, assim como uma alternativa de modelo com estas características. Em seguida são apresentados os testes realizados com o modelo funcional da família de produtos e os resultados esperados. Finalmente os resultados obtidos da aplicação da métrica em conjunto com o processo evolutivo são apresentados e comparados com a formação esperada dos módulos.

5.9.1 Características Desejáveis e Proposta de um Modelo para Teste

Nesta subseção procura-se descrever quais são as características básicas desejáveis de um sistema (modelo do produto) para validar tanto a métrica de custos desenvolvida como o processo evolutivo. Um modelo sistêmico dos integrantes de uma família de produtos com as características imaginadas deve permitir que os módulos potenciais dos produtos sejam identificados sem que um método de modularização específico seja empregado. Imagina-se que um modelo funcional para os integrantes da família de produtos deve apresentar as seguintes características para que seus módulos possam ser identificados:

- os fluxos de material, energia e sinal entre as funções devem ser bem comportados para evidenciar a formação de módulos que maximizem as interações intra módulos;
- isolamento das funções não comuns aos integrantes da família de produtos (variáveis, e ligadas à geração da diversidade de oferta); e
- número de funções presentes suficientemente grande para aferir a convergência do processo de evolução para uma alternativa de arquitetura de enfoque modular de baixo custo.

As características assim definidas podem ser empregadas para gerar uma alternativa de modelo funcional para os integrantes de uma família de produtos. A alternativa de modelo proposta para o teste nesta subseção, assume-se, é válida para todos os integrantes da família de produtos. Para este teste de validação, admite-se que a família de produtos hipotética é formada por 3 integrantes. O modelo funcional proposto é composto de 25 funções e, para este número de funções, existem $4,639E18$ alternativas de arquiteturas de enfoque modular para a família de produtos (expressões 3.1 e 3.2). Este número de alternativas de arquiteturas é considerado suficiente para aferir a convergência do processo de otimização evolutivo. A maioria das funções deste modelo, 24, são comuns aos 3 produtos da família, e uma função deve ser diferenciada para cada um dos integrantes da família. A Figura 5.23 ilustra a Estrutura de Funções proposta para os integrantes da família de 3 produtos. O quadro da Figura 5.24 apresenta as variações necessárias das 25 funções para formar os 3 integrantes da família. Segundo este quadro, os 3 produtos são formados por 24 funções comuns, 1 a 24, e uma função, 25, variável.

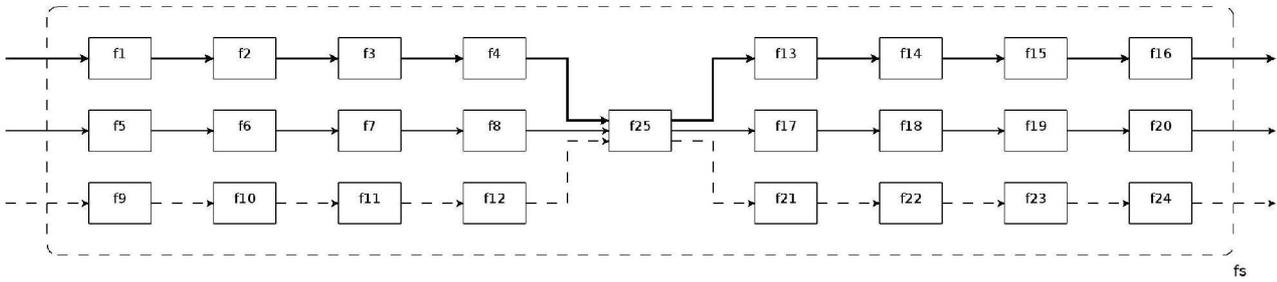


Figura 5.23 – Estrutura de Funções para os integrantes de uma família de 3 produtos

f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8	f9	f10	f11	f12	f13	f14	f15	f16	f17	f18	f19	f20	f21	f22	f23	f24	f25
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3

Figura 5.24 – Variações das funções para cada integrante da família de produtos

O emprego da métrica descrita nas seções anteriores para a avaliação relativa das alternativas de arquitetura de enfoque modular para a família de produtos depende de algumas informações adicionais. A primeira informação necessária é a estimativa relativa dos custos de desenvolvimento de cada uma das funções (e suas variações) da família de produtos. Para o teste proposto utilizam-se os custos estimados de desenvolvimento das funções apresentados no quadro da Figura 5.25 (estimativas relativas de custos diferentes podem ser utilizadas sem alterar os resultados esperados para este teste).

f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8	f9	f10	f11	f12	f13	f14	f15	f16	f17	f18	f19	f20	f21	f22	f23	f24	f25
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4

Figura 5.25 – Estimativas de custos relativos de desenvolvimento das funções

Outra informação necessária é a estimativa relativa dos custos de preparação e montagem para cada uma das interfaces presentes no modelo funcional. Como o modelo proposto assume

interações de material, energia e sinal entre as funções, são necessárias as estimativas relativas de custos para estas 3 interfaces. No teste, os custos estimados relativos utilizados são: material=1, energia=1, e sinal=1. Finalmente é necessário que sejam definidos os pesos dos parâmetros α e β , e, neste teste, os pesos são considerados iguais.

5.9.2 Arquitetura Esperada para o Teste Proposto

O resultado do processo de evolução das alternativas de arquitetura, utilizando a métrica de custos proposta nas seções anteriores, deve coincidir com uma arquitetura de enfoque modular previamente esperada. Devido às peculiaridades do modelo ilustrado na Figura 5.23, quando se consideram tanto os custos de desenvolvimento e de preparação de interface e montagem, espera-se que sejam formados 7 módulos. Os primeiros 6 módulos minimizam as interações entre módulos e maximizam as interações intramodulares, comuns a todos os integrantes da família de produtos. Estes módulos devem apresentar as seguintes composições: 2 módulos compostos por 4 funções trocando sinal entre si ($f_1+f_2+f_3+f_4$ e $f_{13}+f_{14}+f_{15}+f_{16}$), 2 módulos compostos por 4 funções trocando energia entre si ($f_5+f_6+f_7+f_8$ e $f_{17}+f_{18}+f_{19}+f_{20}$), e 2 módulos compostos por 4 funções trocando material entre si ($f_9+f_{10}+f_{11}+f_{12}$ e $f_{21}+f_{22}+f_{23}+f_{24}$). Um último módulo, definido pela função f_{25} , ligado à geração da diversidade de oferta, é sugerido pelo modelo da Figura 5.23 e espera-se que também seja obtido do processo evolutivo. Podem ser obtidas, também, arquiteturas que definam um módulo único das funções que trocam sinal entre si ($f_1+f_2+f_3+f_4+f_{13}+f_{14}+f_{15}+f_{16}$), um módulo único para as funções que trocam energia entre si ($f_5+f_6+f_7+f_8+f_{17}+f_{18}+f_{19}+f_{20}$), e um módulo único para as funções que trocam material entre si ($f_9+f_{10}+f_{11}+f_{12}+f_{21}+f_{22}+f_{23}+f_{24}$). Em qualquer dos casos, a função f_{25} deverá sempre definir um módulo único.

5.9.3 Resultados Obtidos

O processo evolutivo para a minimização do custo relativo estimado total das alternativas de arquitetura de enfoque modular do problema proposto utilizando Algoritmos Genéticos depende de alguns parâmetros, definidos de antemão. Um destes parâmetros, talvez o mais

importante, é o número de indivíduos da população que deverá evoluir. Para este problema, os resultados esperados só foram obtidos para populações iguais ou maiores que 10.000 indivíduos. O índice de mutação da população também é um parâmetro crítico para a evolução. Para o caso da evolução das alternativas de arquitetura de enfoque modular para uma família de produtos, índices de mutação elevados mostraram-se adequados para evitar a eugenia precoce da população. Outra definição importante é o processo de seleção. A seleção das melhores arquiteturas de enfoque modular (menores custos relativos estimados) para uma família de produtos pelo método dos Torneios mostrou-se mais adequada quando comparada com o método do Rank. No método de seleção por Rank, para o problema tratado neste texto, existe uma tendência a instabilidade na proximidade dos valores mínimos da função de avaliação (ou função objetivo), vide Figura 5.26 – esta figura apresenta os resultados de uma otimização de uma população de 1.000 indivíduos, limitada a 300 gerações.

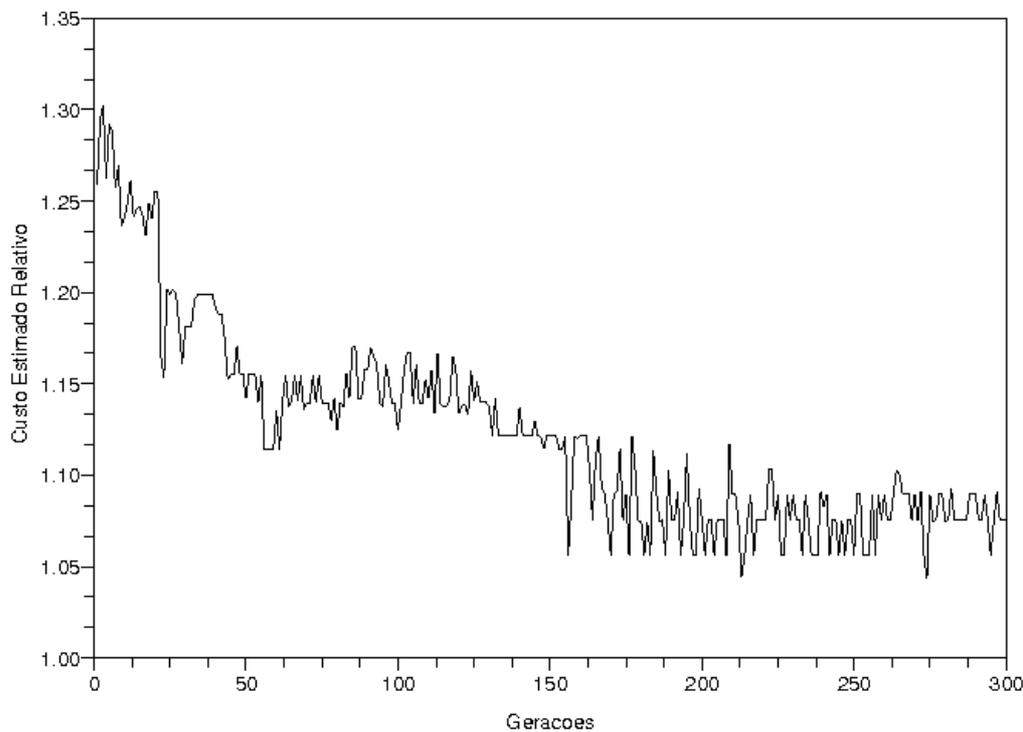


Figura 5.26 – Comportamento instável da seleção por Rank

Para verificar se o uso da métrica em conjunto com o processo evolutivo, propostos nas seções anteriores, resultam na alternativa de arquitetura de enfoque modular esperada para a família de produtos do teste, o algoritmo evolutivo foi executado 8 vezes. O número de execuções do algoritmo é limitado a 8 porque o processo é demorado. Nos testes, o processo evolutivo é considerado encerrado quando o indivíduo mais bem-avaliado da população de arquiteturas (menor custo relativo estimado) permanece inalterado por 20 gerações. Foram consideradas em cada um dos testes populações iniciais de 10.000 indivíduos e taxa de mutações de 0,5, ou seja, 5.000 mutações nas formações das novas populações. A Figura 5.27 ilustra a evolução das arquiteturas mais bem avaliadas de cada uma das populações durante as gerações para as 8 execuções do algoritmo. A arquitetura esperada para a família de produtos proposta como teste foi obtida em 3 das 8 execuções do processo evolutivo (Execuções 1, 3 e 7). Apesar de ser uma amostragem pequena, há indicação de que o processo evolutivo pode resultar na melhor arquitetura para uma família de produtos (de acordo com a métrica proposta) em mais de 1/3 das execuções do algoritmo.

Os resultados obtidos da execução do Algoritmo Genético, Figura 5.27, mostram que a melhor arquitetura para a família de produtos pode ser alcançada tanto nos processos que se estabilizaram cedo (Evolução A e Evolução G) como em processos que se desenvolvem por mais tempo, Evolução C. O pior resultado obtido foi obtido na execução do Algoritmo Genético que se estabilizou mais rapidamente, Evolução E. Apesar do grau elevado de mutações, os processos de otimização foram estabilizados, na média, em 104,25 gerações. O uso de condições de encerramento do processo evolutivo como o número de gerações fixo (por exemplo 200 gerações) ou o aumento do número de gerações que o cromossomo mais bem avaliado permaneça inalterado podem aumentar a probabilidade de se obter uma arquitetura de enfoque modular para a família de produtos de custo estimado relativo mínimo absoluto. Na Tabela 5.1 são compilados o número de gerações (até o fim do processo evolucionário), os tempos de computação e o menor custo estimado relativo para cada uma das 8 evoluções ilustradas na Figura 5.27.

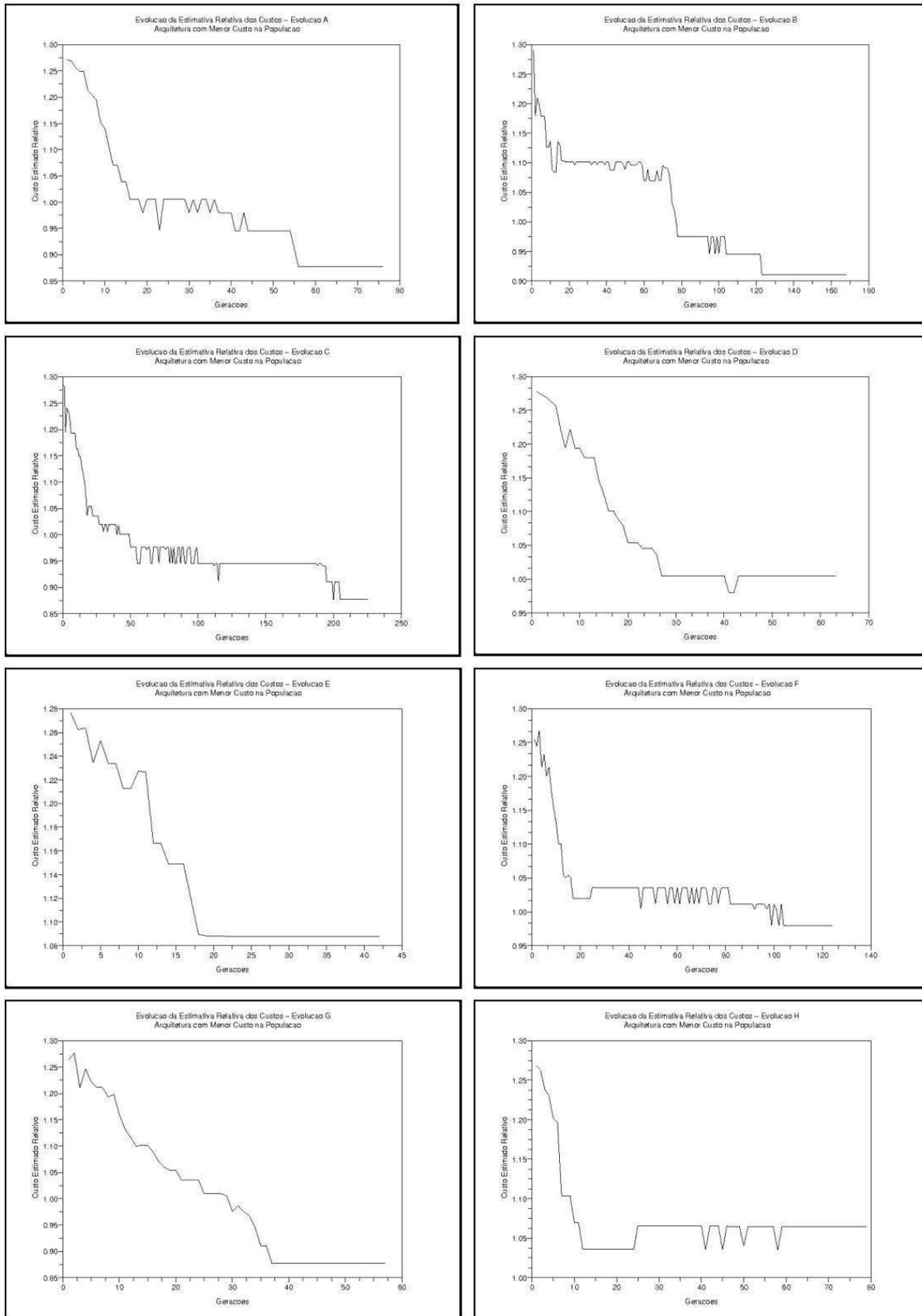


Figura 5.27 – Evolução dos custos estimados das alternativas de arquitetura

Tabela 5.1 – Resultados das execuções do processo evolutivo

Evolução	Gerações	Tempo [s]	Menor Custo Estimado
A	76	30.795,109	0,876623377
B	168	79.408,227	0,910573994
C	225	105.298,800	0,876623377
D	63	28.649,797	0,979944952
E	42	19.497,592	1,08768056
F	124	56.929,873	0,979504035
G	57	28.238,661	0,876623377
H	79	39.449,166	1,03588264
Média	104,25	48.533,403	0,952932039

Exemplos das melhores arquiteturas (agrupamentos funcionais) obtidas da aplicação da métrica proposta e do processo evolutivo para as evoluções A e B são apresentadas nos quadros das Figuras 5.28 e 5.29. A arquitetura sugerida pela Evolução A é a de menor custo relativo estimado enquanto que a arquitetura sugerida pela Evolução B tem custo relativo estimado intermediário, quando comparadas as demais arquiteturas sugeridas pelas execuções do Algoritmo Genético.

A resultado final da Evolução A é uma arquitetura com o menor custo estimado relativo absoluto. Nesta arquitetura específica foram definidos 4 módulos (agrupamentos funcionais), que estão compilados no quadro da Figura 5.28: o primeiro módulo, M1, sugere o agrupamento das funções que trocam sinais entre si; o segundo, M2, agrupa as funções que trocam energia; o terceiro agrupamento, M3, é formado pelas funções que trocam material; por fim, o último módulo, M4, é definido por uma única função que deve ter 3 variações (a, b e c) para gerar a diversidade de produtos desejada para a família.

M	f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8	f9	f10	f11	f12	f13	f14	f15	f16	f17	f18	f19	f20	f21	f22	f23	f24	f25	QTD
1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	300
2	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	300
3	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	300
4a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	150
4b	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	100
4c	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	50

Figura 5.28 – Arquitetura obtida para a família de produtos: Evolução A

No quadro da Figura 5.29 estão ilustrados os módulos formados ao final do processo evolucionário B. O custo estimado relativo desta arquitetura específica sugerida pelo processo de evolução não é um mínimo absoluto, assim como os custos estimados relativos das arquiteturas obtidas nas Evoluções D, E, F e H. Esta arquitetura particular sugere a formação de 7 módulos, 6 deles (1, 2, 3, 4, 5 e 6) comuns a todos os integrantes da família de produtos e 1 módulo, responsável pela geração da diversidade desejada, em 3 versões (módulo 7). Os módulos 2, 3, 4, 6 e 7 desta arquitetura são módulos esperados neste exemplo de teste. Por outro lado, os módulos 1 e 5 deveriam, de acordo com o esperado neste exemplo teste, formar um único módulo. A 'má-formação' dos módulos 1 e 5 resulta em um custo estimado relativo às demais arquiteturas maior que mínimo absoluto.

M	f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8	f9	f10	f11	f12	f13	f14	f15	f16	f17	f18	f19	f20	f21	f22	f23	f24	f25	QTD
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	300
2	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	300
3	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	300
4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	300
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	300
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	300
7a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	150
7b	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	100
7c	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	50

Figura 5.29 – Arquitetura obtida para a família de produtos: Evolução B

Arquiteturas semelhantes às ilustradas nos quadros das Figuras 5.28 e 5.29 foram obtidas para os demais processos evolutivos ilustrados na Figura 5.27 e Tabela 5.1. Uma característica

comum a todas as arquiteturas sugeridas nas evoluções é a formação de um módulo composto apenas pela função f_{25} . Esta é a função que, segundo o teste proposto, diferencia os integrantes da família de produtos. As evoluções A, C e G formaram todos os módulos os esperados. Na Evolução D, duas funções comuns a todos os integrantes da família foram alocadas a módulos não esperados. A Evolução E (o pior custo estimado relativo entre as 8 execuções do algoritmo) resultou numa arquitetura com 4 funções em módulos imprevistos. Na Evolução F, 2 funções comuns foram alocadas de maneira não esperada. Por fim, na Evolução H 3 funções comuns foram alocadas em módulos inesperados.

5.10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A métrica proposta neste capítulo cumpre o objetivo de avaliar relativamente as alternativas de arquitetura para famílias de produtos. Os resultados esperados da aplicação desta métrica sobre modelos funcionais de produtos construídos para testes foram confirmados. O uso de uma medida, como a proposta, para avaliação e definição da arquitetura de uma família de produtos torna o processo de modularização independente da familiaridade dos projetistas com este conceito de desenvolvimento. Sua adoção é uma alternativa de abordagem para o importante problema da definição de uma arquitetura para os produtos, ordenando as alternativas mais atraentes. Para produtos simples, ou seja, poucas funções presentes, sua aplicação é direta, como foi mostrado no exemplo de apresentação da métrica. Porém, as alternativas de arquiteturas para os produtos crescem muito à medida que o número de funções aumenta, inviabilizando a pesquisa de todas as alternativas de arquiteturas.

Assim como na definição das configurações dos produtos, os algoritmos evolutivos mostraram-se uma opção atraente para a busca das melhores alternativas de arquitetura de enfoque modular para uma família de produtos. Em particular, os Algoritmos Genéticos implementados neste trabalho mostraram-se ferramentas adequadas para este tipo de busca. As propostas de codificação, combinação e mutação propostas para este problema produziram o efeito desejado de evolução das alternativas de arquitetura para aquelas de menor custo relativo estimado (segundo a métrica derivada neste capítulo). O aspecto mais importante para a evolução das arquiteturas das famílias de produtos, de acordo com a definição de

cromossomo adotada, é a mutação. A ocorrência de uma mutação em que os módulos de um cromossomo sejam particionados ou, então, unidos é fundamental para êxito do processo evolucionário.

O teste proposto para verificar o comportamento da métrica e da execução do Algoritmo Genético resultou na arquitetura de enfoque modular esperada (intuitivamente a arquitetura obtida é a melhor para a família de produtos). Neste teste foi possível verificar, também, o comportamento do algoritmo de busca da arquitetura de enfoque modular para uma descrição funcional dos produtos relativamente sofisticada (25 funções presentes no modelo). Apesar dos bons resultados obtidos da execução do algoritmo (do ponto de vista da evolução das arquiteturas), o tempo de processamento foi sempre muito alto, na média quase 14 horas até a estabilização do processo. O tempo elevado de evolução pode ser explicado, em parte, pelo uso de linguagens de programação interpretativas e por não haver a premissa de se gerar um código eficiente. De qualquer maneira, a aplicação dos Algoritmos Genéticos à busca das melhores alternativas de arquitetura de enfoque modular para uma família de produtos, apoiada na métrica de custos relativos derivada, mostra-se uma alternativa atraente para tratar este problema.

6 EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Neste capítulo o método desenvolvido no trabalho é aplicado. A primeira seção do capítulo apresenta o exemplo escolhido para ilustrar a aplicação do método. A segunda seção trata do processo de escolha das configurações dos integrantes da família de produtos de acordo com vários objetivos pré-definidos. A seção seguinte mostra a descrição do funcionamento de um dos sistemas da família de produtos escolhido para modularização da sua arquitetura e a quarta seção apresenta informações adicionais necessárias à aplicação do método proposto. A quinta seção ilustra o acoplamento entre a descrição dos produtos segundo suas configurações e suas funções. A sexta seção mostra os resultados obtidos do processo de modularização da arquitetura da família de produtos utilizada no exemplo. Para encerrar o capítulo, a sétima seção é dedicada as considerações finais à aplicação do método desenvolvido.

6.1 DEFINIÇÃO DOS ATRIBUTOS DA FAMÍLIA

Para ilustrar a aplicabilidade do método desenvolvido neste trabalho, propõe-se a configuração dos integrantes de uma família de mini fornos elétricos e a definição de sua arquitetura (de enfoque modular). A primeira parte do capítulo trata da escolha dos atributos dos integrantes da família de produtos. Neste exemplo de aplicação, uma marca inexistente de mini fornos elétricos, chamada Hot, é utilizada como alternativa de configuração contra marcas já presentes no mercado. Para a aplicação do processo de escolha dos demais atributos da família de produtos devem ser conhecidas as configurações dos produtos concorrentes e como podem ser descritos os produtos neste segmento de mercado através de um conjunto de atributos e seus níveis. Os produtos concorrentes, neste exemplo de aplicação, são reais e seus atributos são apresentados na subseção seguinte. A partir dos atributos dos produtos disponíveis no mercado são definidos os níveis dos atributos empregados na descrição tanto dos produtos concorrentes como dos potenciais produtos próprios. A descrição dos potenciais produtos deste segmento de mercado permite que sejam realizadas as medições das preferências dos consumidores. Algumas observações sobre as preferências dos consumidores, após o tratamento preliminar das informações de preferências dos consumidores obtidas segundo

procedimento apresentado no Apêndice B deste trabalho, são feitas ainda na primeira parte do capítulo.

6.1.1 Os Produtos Concorrentes e seus Atributos

Na primeira parte desta subseção são listados os atributos que são empregados para descrever os mini fornos elétricos. Na segunda, os critérios segundo os quais os produtos concorrentes são escolhidos são listados. Os atributos considerados importantes, obtidos de entrevistas com potenciais consumidores e dos atributos de produtos disponíveis no mercado, para descrever e diferenciar os mini fornos elétricos são:

- Marca: nome do fabricante do produto;
- Preço aproximado praticado no varejo;
- Capacidade: volume do forno;
- Controle do aquecimento: opções de aquecimento do forno;
- Temporizador: programação de tempo de cozimento com aviso sonoro;
- Potência: capacidade de fornecimento de energia para o cozimento;
- *Display*: tela para mostrar informações do temporizador e do aquecimento do forno (este atributo não está presente em nenhuma configuração de produtos concorrentes e foi adicionado a lista de atributos como um diferencial dos mini fornos elétricos da marca Hot);
- Cor predominante do forno;
- *Layout*: disposição espacial dos principais elementos do forno (controles e fornos colocados lado-a-lado e controles sob o forno); e
- Abertura da porta: eixo vertical ou horizontal.

As características dos concorrentes da família de produtos que se pretende configurar foram limitadas. Os mini fornos elétricos que foram considerados como concorrentes da família de mini fornos elétricos da marca Hot compartilham as seguintes características:

- O preço para os consumidores é menor que R\$250,00;
- Os produtos disponíveis para a compra, porém descontinuados pelos fabricantes, foram desconsiderados;
- Produtos de marcas pouco conhecidas que não são encontrados com facilidade não fazem parte deste exemplo; e
- Os preços de venda admitidos são aproximações dos preços reais encontrados nas lojas.

6.1.2 Os Atributos dos Produtos Concorrentes

Foram encontrados 7 mini fornos com as características mencionadas na subseção anterior. Estes mini fornos são de 6 marcas diferentes. A descrição destes mini fornos de acordo com os atributos considerados neste exemplo de aplicação são apresentados no quadro da Figura 6.1.

marca	preço [Reais]	capacidade [litros]	controle aquecimento	temporizador c/aviso sonoro	potência [Watts]	display	cor	layout	abertura da porta [eixo]
Arno (Forma)	175,00	8	presente	presente	800	ausente	prata	vertical	horizontal
B&D (FE500)	170,00	8	presente	presente	650	ausente	preto	horizontal	horizontal
Britânia (9L)	160,00	9	presente	presente	800	ausente	prata	horizontal	horizontal
Cadence (For750)	100,00	7	ausente	presente	650	ausente	preto	horizontal	horizontal
Suggar (8L)	100,00	8	presente	presente	700	ausente	branco	horizontal	horizontal
Walita (RI4493)	170,00	9	ausente	presente	820	ausente	prata	vertical	horizontal
Walita (RI4495)	225,00	9	presente	presente	1100	ausente	prata	vertical	horizontal

Figura 6.1 – Descrição dos mini fornos elétricos concorrentes

6.1.3 Os Níveis dos Atributos dos Produtos

Para cada um dos atributos escolhidos neste exemplo de aplicação, são identificados seus níveis alternativos. Para o atributo Marca, os produtos podem assumir 7 níveis diferentes: 6

níveis para cada uma das marcas encontradas no mercado e 1 nível para a marca da empresa que está configurando seus produtos. As 6 marcas presentes no mercado (admitidas neste exemplo) são mostradas no quadro da Figura 6.2 (Arno, Black & Decker, Britânia, Cadence, Suggar e Walita). A marca cujos produtos deseja-se configurar será chamada neste exemplo de Hot. Os níveis admitidos de preços aos consumidores são 6, começando em R\$100,00 e terminando em R\$225,00, com intervalos de R\$25,00 entre os níveis. Três níveis de capacidade são considerados: 7, 8 ou 9 litros. A potência dos fornos pode assumir 3 níveis alternativos: 650, 850 ou 1050 Watts. A cor do mini forno pode variar em 4 níveis. Três níveis correspondem às cores usuais disponibilizados pelos fabricantes aos consumidores: branco, preto e prata. Um nível é reservado para medir a utilidade de um mini forno colorido (vermelho) para os consumidores. O controle de aquecimento, o temporizador e o *display* podem assumir 2 níveis: presente ou ausente (o temporizador está presente em todos os produtos concorrentes e o *display* não está presente em nenhum). Finalmente o *layout* dos produtos e o eixo de abertura da porta do forno também são considerados para a avaliação dos consumidores. Duas alternativas de *layout* são consideradas: vertical e horizontal. No *layout* vertical a porta do forno é colocada sobre os controles do forno e no *layout* horizontal a porta está ao lado dos controles. A abertura da porta do forno também é avaliada em 2 níveis, consideram-se duas possibilidades para que a porta seja aberta: eixo de abertura horizontal (como nos fornos tradicionais) ou eixo vertical (como usualmente disponibilizado nos fornos microondas). O quadro da Figura 6.2 reúne os níveis adotados para cada um dos atributos utilizados no exemplo de aplicação.

NÍVEIS	ATRIBUTOS									
	marca	preço [Reais]	capacidade [Litros]	controle aquecimento	temporizador c/aviso sonoro	potência [Watts]	<i>display</i>	cor	<i>layout</i>	abertura da porta [Eixo]
1	Arno	100,00	7	presente	presente	650	presente	branco	horizontal	horizontal
2	B&D	125,00	8	ausente	ausente	850	ausente	preto	vertical	vertical
3	Britânia	150,00	9	---	---	1050	---	prata	---	---
4	Cadence	175,00	---	---	---	---	---	vermelho	---	---
5	Hot	200,00	---	---	---	---	---	---	---	---
6	Suggar	225,00	---	---	---	---	---	---	---	---
7	Walita	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Figura 6.2 – Níveis dos atributos dos produtos para o exemplo de aplicação

Para este número de atributos, podem ser oferecidos aos consumidores $7 \times 6 \times 3 \times 3 \times 4 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 = 48.384$ configurações diferentes de produtos. Para os produtos de uma marca específica podem ser oferecidas 6.912 configurações diferenciadas para os consumidores. Para configurar uma família de produtos de uma determinada marca composta de 2 integrantes deve-se escolher entre 23.884.416 alternativas, caso a família seja de 3 integrantes o número de alternativas é de 55.013.771.520.

6.1.4 O Levantamento das Preferências dos Consumidores

O levantamento das preferências dos consumidores pode seguir abordagens composicionais, decomposicionais, ou híbridas (quando as duas primeiras abordagens são combinadas). A adoção de uma abordagem composicional produz resultados menos precisos e a abordagem decomposicional depende do ordenamento de um conjunto grande de configurações alternativas de produtos, tarefa complicada quando muitos consumidores são consultados. Devido às peculiaridades destas abordagens específicas, decidiu-se por uma nova abordagem híbrida de medição das preferências dos consumidores, apresentada no Apêndice B deste trabalho.

O procedimento de levantamento das preferências dos consumidores apresentado no Apêndice B foi aplicado a 42 consumidores potenciais. Estes consumidores potenciais são, majoritariamente, alunos dos cursos da UFSC. A maior parte das entrevistas, cerca de 80%, foi conduzida de forma coletiva, o restante de forma individualizada. Na média, as entrevistas duraram cerca de 30 minutos. Durante as entrevistas não foi mencionado que a marca Hot não era real e que os produtos seriam configurados especificamente para ela.

As utilidades parciais dos níveis dos atributos dos mini fornos elétricos para cada um dos potenciais consumidores pesquisados podem ser encontradas no Apêndice B deste trabalho. As importâncias médias deste grupo de 42 potenciais consumidores consultados estão compiladas no quadro da Figura 6.3. Neste quadro pode-se ver que o atributo de maior importância, para um consumidor médio (que tem um comportamento representado pela média dos 42 indivíduos pesquisados), é o volume do forno, em seguida tem-se a presença do *display* e do temporizador com aviso sonoro. Os próximos atributos, por ordem de

importância para estes consumidores, são marca, preço e cor, seguidos por potência e controle de aquecimento. Por fim, com importâncias relativas marginais, estão *layout* e o eixo de abertura da porta. É interessante notar que para este consumidor médio, marca e preço não são os atributos mais importantes na decisão da compra de um mini forno elétrico.

Atributos	Importâncias [%]
Marca	10,27
Preço	11,18
Capacidade	21,27
Controle	5,34
Temporizador	16,66
Potência	7,22
<i>Display</i>	15,37
Cor	10,62
<i>layout</i>	1,72
Abertura da Porta	0,35

Figura 6.3 – Comparativo das importâncias dos atributos (consumidores médio)

Ainda considerando o comportamento de um consumidor cujas preferências sejam iguais à média dos indivíduos pesquisados, é interessante notar qual é a utilidade para cada um dos níveis de preços sugeridos na pesquisa. A Figura 6.4 ilustra esta variação. O comportamento da utilidade deste atributo particular é próximo do esperado: grande utilidade para preços baixos e alta sensibilidade para alterações do preço nesta faixa. Nas faixas mais altas dos preços a utilidade é baixa, assim como a sensibilidade a alteração dos preços.

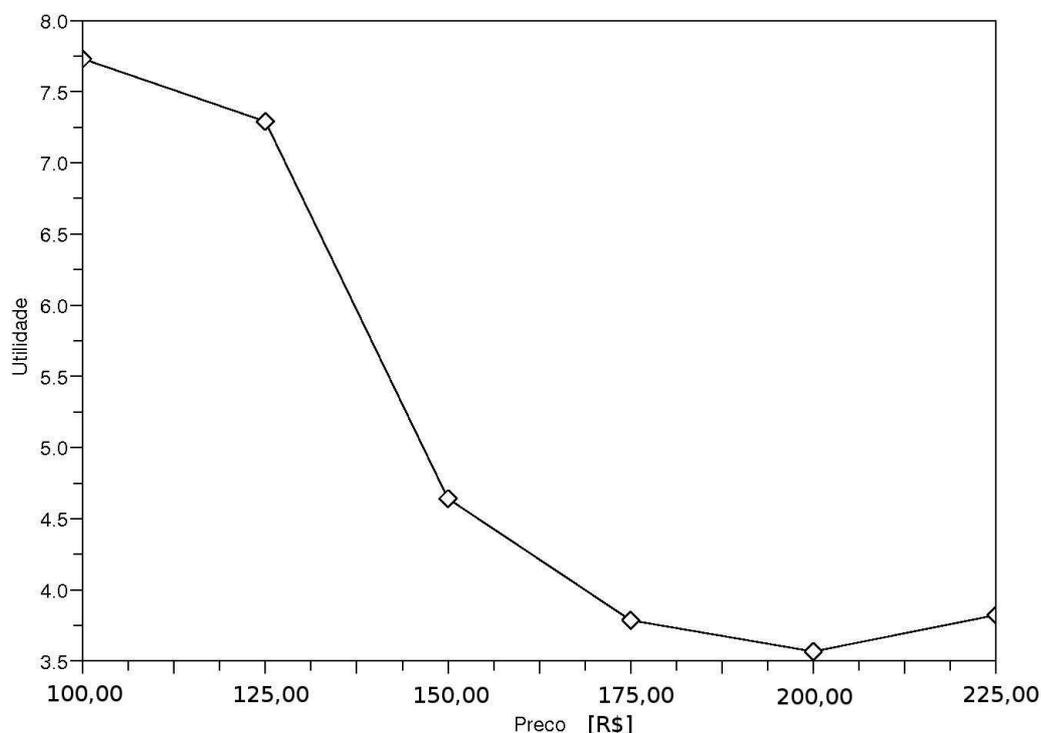


Figura 6.4 – Comportamento da utilidade quando os preços variam (consumidor médio)

6.2 CONFIGURAÇÕES ÓTIMAS

A dimensão da variedade da família de mini fornos elétricos e os atributos de seus integrantes, admite-se, são escolhidos com o objetivo de maximizar a receita de uma empresa que está entrando no mercado. Neste exemplo de aplicação admite-se que todas as configurações de produtos listadas no quadro da Figura 6.1 estão disponíveis para aquisição em todo o país. O número de entrevistas (42), para a ilustração pretendida, é admitido suficiente e representativo das preferências do conjunto de consumidores potenciais desta categoria de produtos.

O mercado nacional assumido é de 300.000 unidades anuais. Este mercado é estimado considerando-se informações presentes na Tabela Produção e Vendas dos Produtos e/ou Serviços Industriais, Segundo Classe de Atividades e Descrição dos Produtos – Brasil – 2005 (IBGE, 2005). Nesta tabela, com o código PRODLIST 2989.0150 encontra-se a rúbrica: Fornos, fogareiros, churrasqueiras, etc., elétricas, exceto forno de microondas. Nesta rúbrica

são registrados 648.410 unidades deste tipo de produtos vendidos no Brasil no ano de 2005. Admitindo que churrasqueiras, fogareiros e fornos elétricos de maior capacidade sejam aproximadamente a metade deste mercado, chega-se à demanda assumida de 300.000 unidades de mini fornos elétricos por ano no país.

6.2.1 Configuração dos Produtos para Máxima Utilidade

Antes de buscar as configurações dos integrantes da família de produtos que resultam em máxima receita é interessante conhecer quais são as configurações de máxima utilidade para os indivíduos pesquisados (que neste exemplo de aplicação representam as preferências dos consumidores potenciais do produto). Portanto, inicialmente o algoritmo evolutivo é executado para que seja conhecida qual é a configuração de maior utilidade para os entrevistados entre as opções que podem ser oferecidas aos consumidores sem adição de novos atributos aos já existentes no mercado. Ou seja, as opções estão limitadas aos produtos de qualquer uma das marcas, exceto Hot, e a ausência de *display*. O comportamento do processo evolutivo é apresentado na Figura 6.5.

A configuração 'ideal' da perspectiva dos potenciais consumidores é de um mini forno elétrico da marca Walita, preço de R\$100,00, capacidade 9 litros, presença de controle de aquecimento e temporizador, 1050 Watts de potência, branco, *layout* vertical e abertura de porta também vertical. A utilidade total desta configuração é de 82,02 unidades de utilidade relativa. Quando é permitida a adição do atributo *display* à configuração do produto, a configuração ideal é a mesma da anterior, adicionando-se o *display*. A utilidade total desta configuração entre os consumidores pesquisados aumenta de 82,02 para 90,75 unidades de utilidade relativa.

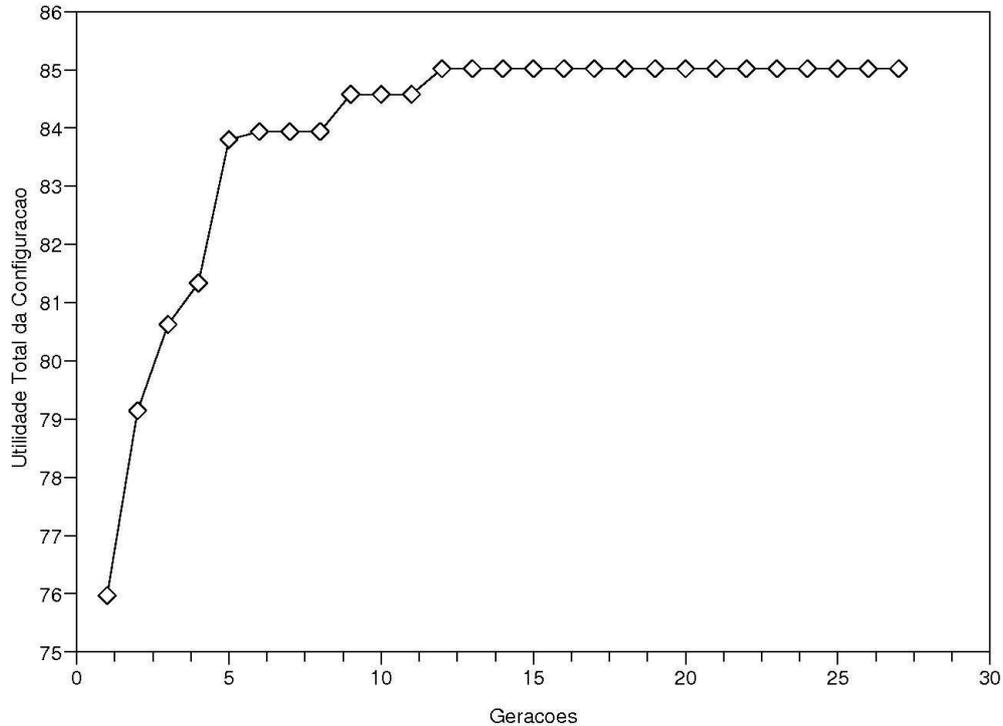


Figura 6.5 – Comportamento evolutivo da configuração de máxima utilidade

Quando se deseja conhecer a configuração do produto de maior utilidade da marca Hot utiliza-se o mesmo procedimento. Neste caso não são permitidas configurações das demais marcas. A configuração ideal de um mini forno da marca Hot, do ponto de vista dos consumidores (maximização da utilidade), deve ter o preço de R\$100,00, capacidade 9 litros, presença de controle de aquecimento e temporizador, 1050 Watts de potência, *display* presente, branco, *layout* vertical e abertura de porta também vertical – ou seja, à exceção da marca, todos os demais atributos são iguais aos obtidos para maximizar a utilidade dos produtos sem a restrição de marca. A utilidade total desta configuração entre os indivíduos pesquisados é de 89,58, próxima da utilidade máxima de 90,75 registrada para a mesma configuração com a marca Walita. A Figura 6.6 ilustra a evolução da utilidade da configuração mais apto da população em cada geração.

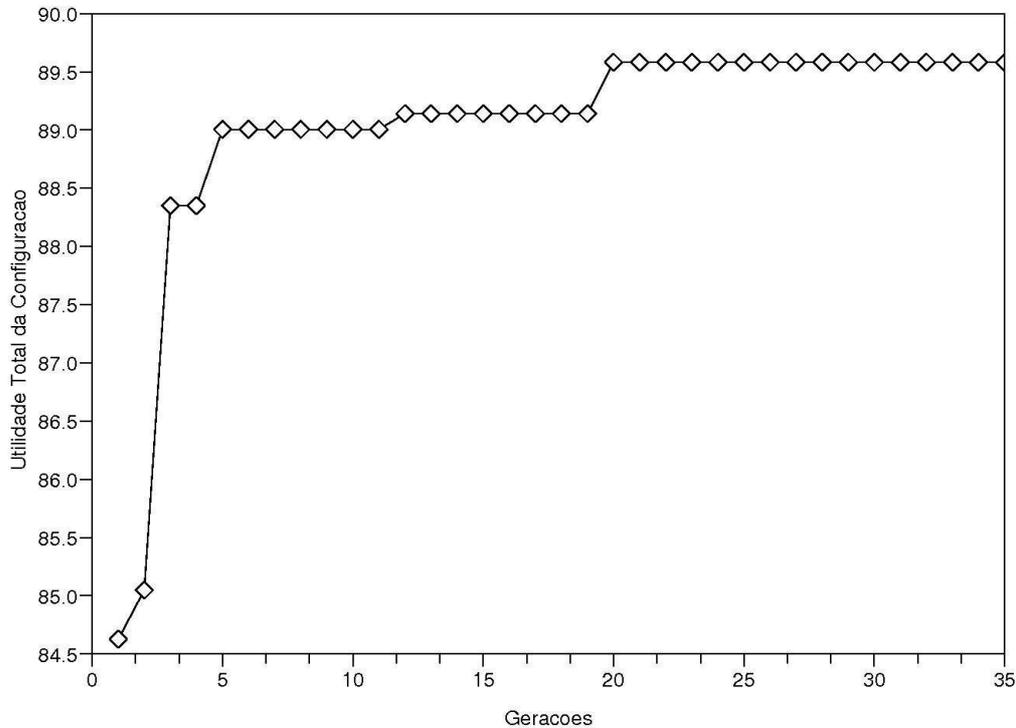


Figura 6.6 – Comportamento evolutivo da configuração de um mini forno da marca Hot

Nos processos evolutivos das configurações para a maximização da utilidade dos potenciais consumidores foram utilizadas taxas de renovação da população a cada geração de 90%. 10% dos cromossomos sofrem mutações. A evolução é encerrada quando, após 15 gerações, não ocorria alteração do cromossomo melhor avaliado da população. Por fim, nas evoluções as populações foram compostas por 50 alternativas de configurações.

6.2.2 Configurações dos Produtos para Máxima Receita (Com Restrição)

Nesta seção são mostradas as configurações de famílias de mini fornos elétricos obtidas da aplicação do processo de escolha baseado em algoritmos evolutivos para máxima receita do fabricante. Para este objetivo escolhido (maior receita) são definidas as configurações de 1 produto e de famílias compostas de 2 e 3. Os produtos são configurados com a restrição de marca, ou seja apenas produtos da marca Hot, e com restrição, inicialmente, à presença de *display*. A restrição ao *display* é colocada porque os consumidores vêem utilidade relativa

significativa neste atributo, que não está presente em nenhum dos concorrentes, distorcendo as estimativas de participação de mercado. Num segundo momento, na configuração dos integrantes de uma família de 3 integrantes, que será utilizada posteriormente para a modularização da arquitetura da família, permite-se a presença deste atributo.

As informações medidas das preferências dos 42 consumidores representam, nesta ilustração, as preferências dos potenciais consumidores dos mini fornos elétricos. No cálculo da receita utiliza-se a demanda estimada de 300.000 unidades. Considera-se que o produtor não é o vendedor final e assume-se que os produtos sejam vendidos pelo fabricante por 0.65 do seu preço de venda ao consumidor. O modelo de decisão dos consumidores é uma variação do modelo de aquisição do produto de maior utilidade entre os ofertados ao mercado. Neste exemplo de aplicação considera-se que todas as configurações com utilidade maior que 0.85 da configuração mais útil (para um consumidor particular) têm a mesma probabilidade de aquisição. Os demais parâmetros de execução do algoritmo evolutivo são idênticos aos utilizados na configuração do produto de maior utilidade para os consumidores.

Para definir as configurações de todos os produtos das famílias sugeridas, bem como do produto único, o algoritmo evolutivo é executado 4 vezes. A primeira configuração obtida de acordo com este procedimento é a de 1 produto da marca Hot (sem *display*) que disputa mercado com as 7 configurações concorrentes disponíveis. Os resultados das 4 execuções do algoritmo evolutivo são mostradas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Configuração de 1 produto para máxima receita

Execução	Tempo [s]	Receita [R\$] (estimativa anual)	Configuração	Unidades (estimativa anual)
A	64,77	8.342.219,39	5 6 3 1 1 3 2 1 2 2	57.030
B	62,87	8.069.866,07	5 6 3 1 1 3 2 2 1 1	55.170
C	65,36	8.342.219,39	5 6 3 1 1 3 2 1 2 2	57.030
D	83,60	8.069.866,07	5 6 3 1 1 3 2 2 1 1	55.170
Média	69,15	8,206,042,73	---	56.100

Na execução do algoritmo evolutivo com o objetivo de definir a configuração de um produto para maximizar a receita contra a concorrência foram obtidas duas opções. Em ambas o número de unidades estimadas que podem ser colocadas anualmente no mercado com aceitação dos consumidores fica acima de 55.000. Na Tabela 6.1, na coluna Configuração, são registrados os níveis de cada um dos atributos escolhidos para descrever o produto da marca Hot (nível 5 do atributo Marca) que maximiza a receita considerando os concorrentes que, admite-se, estão presentes no mercado. Esta configuração para as execuções A e C da Tabela 6.1, além da marca Hot, é definida pelo preço de venda R\$225,00 (nível 6 deste atributo), capacidade 9 litros (nível 3), presença do controle de aquecimento (nível 1) e do temporizador (nível 1), potência de 1.050 Watts (nível 3), ausência de *display* (devido a restrição presente) (nível 2), de cor branca (nível 1), layout vertical (nível 2), e abertura de porta em torno de eixo vertical (nível 2). Os consumidores pesquisados que consideram esta configuração mais útil que as demais presentes no mercado são aproximadamente 19% do total de indivíduos questionados. O tempo de execução do algoritmo para a configuração de 1 produto é de pouco mais de 1 minuto.

Tabela 6.2 – Configurações de 2 produtos para máxima receita

Execução	Tempo [s]	Receita [R\$] (estimativa anual)	Configurações	Unidades (estimativa anual)
A	118,53	13.824.107,10	5 6 3 1 1 3 2 1 2 2	49.440
			5 6 3 1 1 3 2 2 1 1	45.060
B	126,90	13.824.107,10	5 6 3 1 1 3 2 1 2 2	49.440
			5 6 3 1 1 3 2 2 1 1	45.060
C	93,90	13.824.107,10	5 6 3 1 1 3 2 2 1 1	45.060
			5 6 3 1 1 3 2 1 2 2	49.440
D	73,09	13.727.933,70	5 6 3 2 1 3 2 2 1 2	42.135
			5 6 3 1 1 3 2 1 2 2	51.729
Média	103,11	13,800,063,75	---	94.341

As Tabelas 6.2 e 6.3 apresentam informações semelhantes à Tabela 6.1 para a configuração de famílias de produtos de 2 e 3 integrantes, respectivamente. Os melhores resultados, em termos de receita, para a configuração dos 2 integrantes de uma família de produtos, de acordo com a

Tabela 6.2, foram obtidos das execuções A, B e C do algoritmo evolutivo. Nestas execuções, repetiu-se a configuração melhor avaliada da Tabela 6.1 e a configuração adicional que difere da primeira na cor, desta vez preto, e no *layout* que deve ser horizontal, assim como na abertura da porta – também horizontal. A participação de mercado destas 2 configurações é estimada acima dos 30%. O tempo de execução do algoritmo evolutivo é, ainda, muito baixo, pouco acima de 1 minuto e meio.

Tabela 6.3 – Configurações de 3 produtos para máxima receita

Execução	Tempo [s]	Receita [R\$] (estimativa anual)	Configurações	Unidades (estimativa anual)
A	130,26	17.582.334,20	5 6 2 1 1 3 2 2 2 1	46.080
			5 6 3 1 1 3 2 1 2 1	41.010
			5 6 3 2 1 3 2 2 1 2	33.108
B	158,64	17.654.464,30	5 6 3 1 1 3 2 1 2 2	42.540
			5 6 3 1 1 3 2 2 1 1	38.901
			5 6 3 1 1 3 2 1 2 1	39.267
C	105,15	17.574.872,40	5 6 3 1 1 3 2 1 2 2	43.767
			5 6 3 2 1 3 2 2 1 2	34.233
			5 6 3 2 1 3 2 1 2 2	42.168
D	179,55	17.093.728,70	5 6 3 1 1 3 2 1 1 1	38.562
			5 5 3 1 1 3 2 1 2 1	39.099
			5 6 3 1 1 3 2 1 2 2	43.563
Média	143,40	17.476.349,90	---	120.575

Além das configurações ótimas para a família de 2 integrantes mostradas na Tabela 6.2 é definida na execução B do algoritmo evolutivo presente na Tabela 6.3 a configuração do terceiro produto da família. Esta nova configuração é praticamente idêntica à configuração de um dos produtos da família com 2 integrantes. A única diferença é a abertura da porta que passou de um eixo vertical para um eixo horizontal. Na definição das configurações de 3 produtos de uma família, o tempo de execução do algoritmo foi incrementado, na média, de aproximadamente 40 segundos e a receita anual estimada, também na média, de aproximadamente R\$3.600.000,00.

Assim como foram obtidas as configurações individual e para famílias de 2 e 3 produtos, podem ser obtidas configurações para famílias compostas de mais integrantes. A Figura 6.7

ilustra o aumento da receita média estimada das configurações das famílias de produtos com o aumento da dimensão da família (até 5 integrantes).

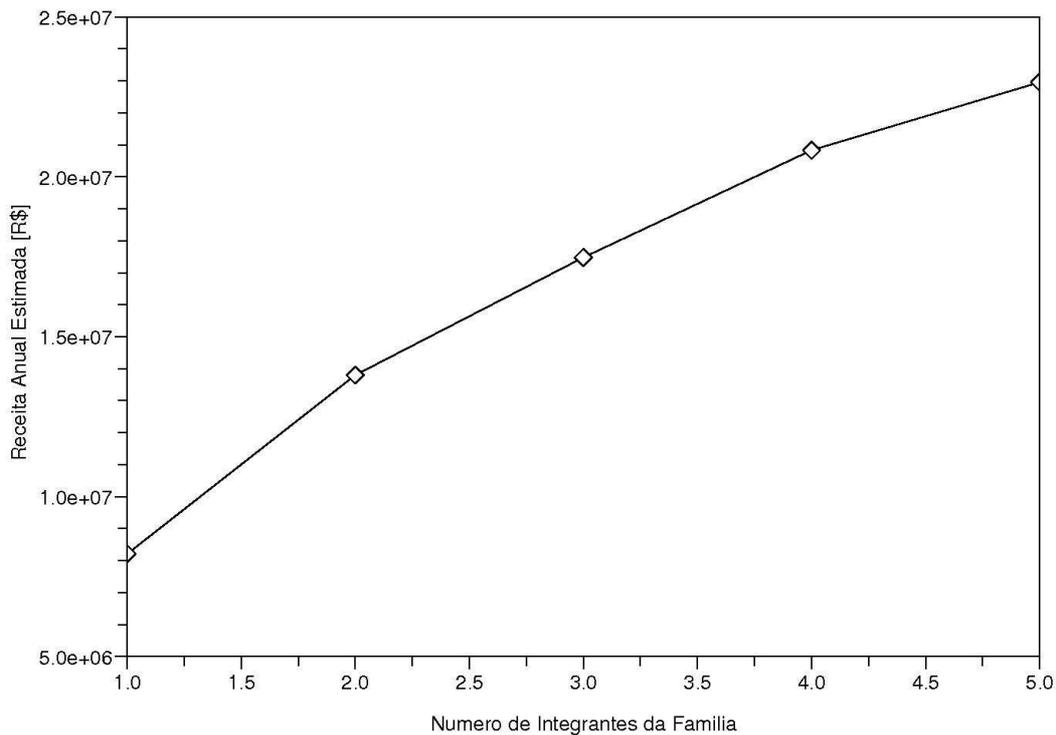


Figura 6.7 – Variação da receita estimada com o aumento de integrantes da família

6.2.3 Configurações dos Produtos para Máxima Receita (Com *Display*)

A última alternativa de configuração de produtos ilustrada é a de uma família de 3 integrantes da marca Hot sem que haja restrição à presença do *display*. As configurações obtidas para os 3 produtos são utilizadas na seqüência para a modularização da arquitetura, segundo o método proposto. As configurações destes produtos são mostradas na Tabela 6.4 e comportamento do processo evolutivo é ilustrado na Figura 6.8. As configurações foram obtidas contra a concorrência e, novamente, o objetivo é maximizar a receita proveniente da venda destes produtos. Todos os parâmetros necessários à execução do algoritmo evolutivo empregados na

subseção anterior foram mantidos.

Tabela 6.4 – Configurações de uma família de 3 produtos para máxima receita, com *display*

Execução	Tempo [s]	Receita [R\$] (estimativa anual)	Configurações	Unidades (estimativa anual)
A	142,61	23.191.071,40	5 6 2 1 1 3 1 1 2 1	49.467
			5 6 3 2 1 3 1 2 1 2	50.112
			5 6 3 1 1 3 1 1 1 2	58.989
B	225,95	23.191.071,40	5 6 2 1 1 3 1 1 2 1	49.467
			5 6 3 1 1 3 1 1 1 2	58.989
			5 6 3 2 1 3 1 2 1 2	50.112
C	224,92	22.882.653,10	5 6 3 1 1 3 1 2 1 2	57.906
			5 6 2 1 1 1 1 2 2 2	44.217
			5 6 2 1 1 3 1 2 1 1	54.336
D	173,47	22.882.653,10	5 6 2 1 1 3 1 2 1 1	54.336
			5 6 3 1 1 3 1 2 1 2	57.906
			5 6 2 1 1 1 1 2 2 2	44.217
Média	191,74	23.036.862,25	---	157.513,5

Os 3 modelos de mini fornos elétricos configurados pelo procedimento proposto são ilustrados na Figura 6.9. Os 3 modelos são, obviamente, da marca Hot. Todos têm preço de R\$225,00, temporizador com aviso sonoro, potência de 1050 Watts e *display*. A capacidade do modelo P1 da Figura 6.9 é de 8 litros, dos modelos P2 e P3 é de 9 litros. O modelo P2 não tem controle de aquecimento enquanto os demais modelos têm. Os modelos P1 e P3 são majoritariamente de cor branca, o modelo P2 é preto. O modelo P1 tem *layout* vertical e abertura de porta em torno de eixo horizontal. Os modelos P2 e P3 têm *layout* horizontal e abertura de porta em torno de eixo vertical.

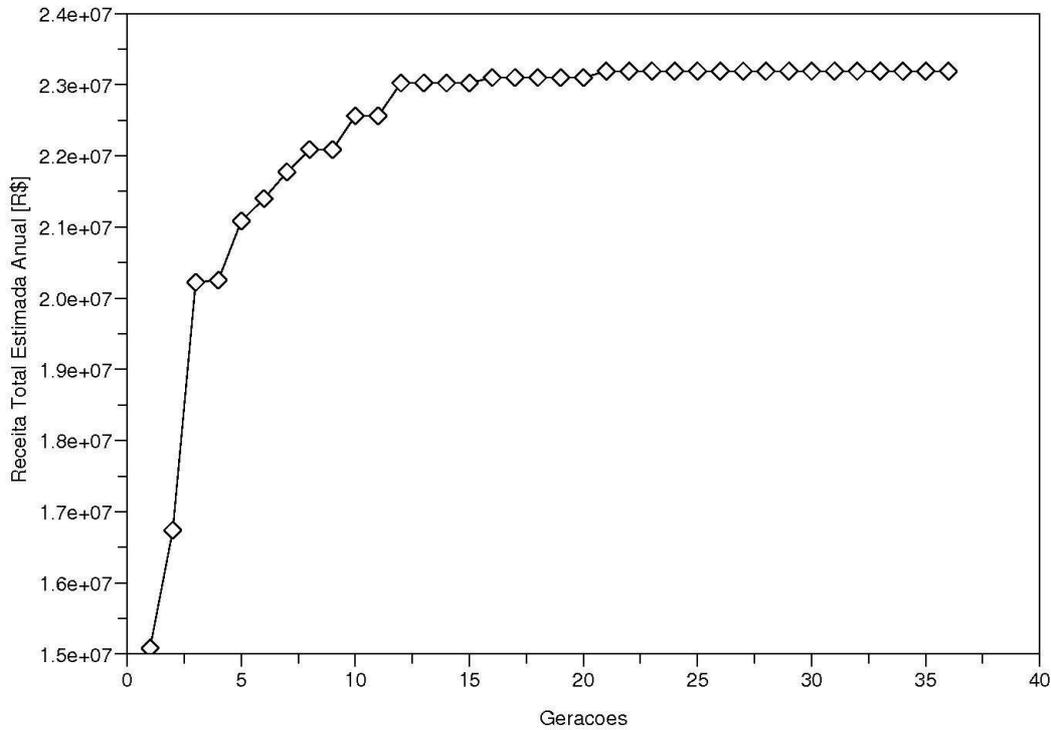


Figura 6.8 – Comportamento evolutivo para configuração de uma família de 3 produtos

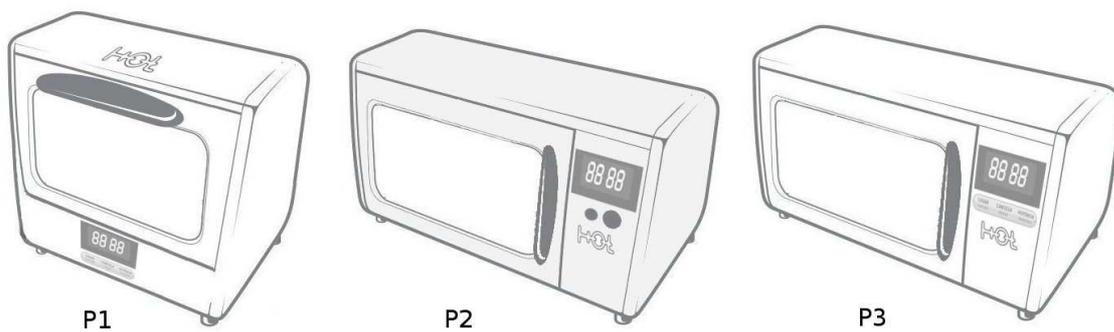


Figura 6.9 – Configurações dos 3 produtos da família de mini fornos elétricos da marca Hot^{6.1}

Após a definição dos atributos dos produtos em sintonia com as preferências dos consumidores potenciais e o objetivo do fabricante, pode-se definir a arquitetura de enfoque modular da família. Nas próximas seções as descrições dos produtos pelos seus atributos são

^{6.1} Formas derivadas do modelo de mini forno elétrico Britânia

espelhadas nas funções do sistema de aquecimento e controle dos produtos e, em seguida, o processo de modularização da arquitetura da família de produtos é empregado.

6.3 MODELO FUNCIONAL DO SISTEMA DE AQUECIMENTO E CONTROLE

O sistema mais importante dos mini fornos elétricos é o de aquecimento e controle. Este sistema é o alvo para modularização da arquitetura neste exemplo de aplicação. A modularização da arquitetura segue a proposta apresentada no Capítulo 5. Para definir os agrupamentos funcionais (futuros componentes), deve-se conhecer as funções do sistema de aquecimento e controle dos mini fornos elétricos e as interações entre estas funções. Uma proposta para este sistema é apresentada nos próximos parágrafos.

O sistema de aquecimento e controle utilizado neste exemplo de aplicação é composto de 30 funções, listadas no quadro da Figura 6.10. Destas funções, 17 são de transporte de energia e sinal. Admite-se que neste exemplo de aplicação as funções do sistema e suas interações são compartilhadas pelos 3 integrantes da família de produtos.

Para visualizar as interações entre as funções listadas no quadro da Figura 6.10, pode-se utilizar o modelo de sistema chamado Estrutura de Funções. Neste modelo são mostradas graficamente as funções e as trocas de material, energia e sinal entre elas. A Estrutura de Funções do sistema de aquecimento e controle proposto para a família de mini fornos elétricos é ilustrada na Figura 6.11. Nesta figura as funções são representadas por caixas com descrições sucintas, as trocas de energia são representadas por linhas cheias e as trocas de sinal são representadas por linhas pontilhadas. Não existe neste sistema trocas de material entre as funções. Ainda na Figura 6.11, a fronteira do sistema (fs) é representada por linha tracejada.

Número da função	Descrição da função
f1	acoplar à rede de energia elétrica
f2	transportar a energia até o equipamento – X1
f3	dividir (ramificar) o fluxo de energia
f4	transportar energia elétrica – X2
f5	chavear o fluxo de energia elétrica (1)
f6	transportar energia elétrica – X9
f7	transformar a energia elétrica em calor (1)
f8	transportar energia elétrica – X3
f9	chavear o fluxo de energia elétrica (2)
f10	transportar energia elétrica – X10
f11	transformar a energia elétrica em calor (2)
f12	transportar energia elétrica – X4
f13	transformar (baixar) a tensão elétrica
f14	transportar energia elétrica – X5
f15	transportar energia elétrica – X6
f16	transportar energia elétrica – X7
f17	transportar energia elétrica – X8
f18	interpretar o sinal de controle (aquecimento)
f19	transportar sinal elétrico – Y1
f20	processar informações de controle (aquecimento)
f21	interpretar o sinal de controle (duração)
f22	transportar sinal elétrico – Y2
f23	processar informações de controle (duração)
f24	combinar as informações processadas
f25	transportar sinal elétrico – Y3
f26	transportar sinal elétrico – Y4
f27	transportar sinal elétrico – Y5
f28	mostrar informações
f29	transportar sinal elétrico – Y6
f30	soar sinal

Figura 6.10 – Descrição das funções do sistema de aquecimento e controle dos mini fornos

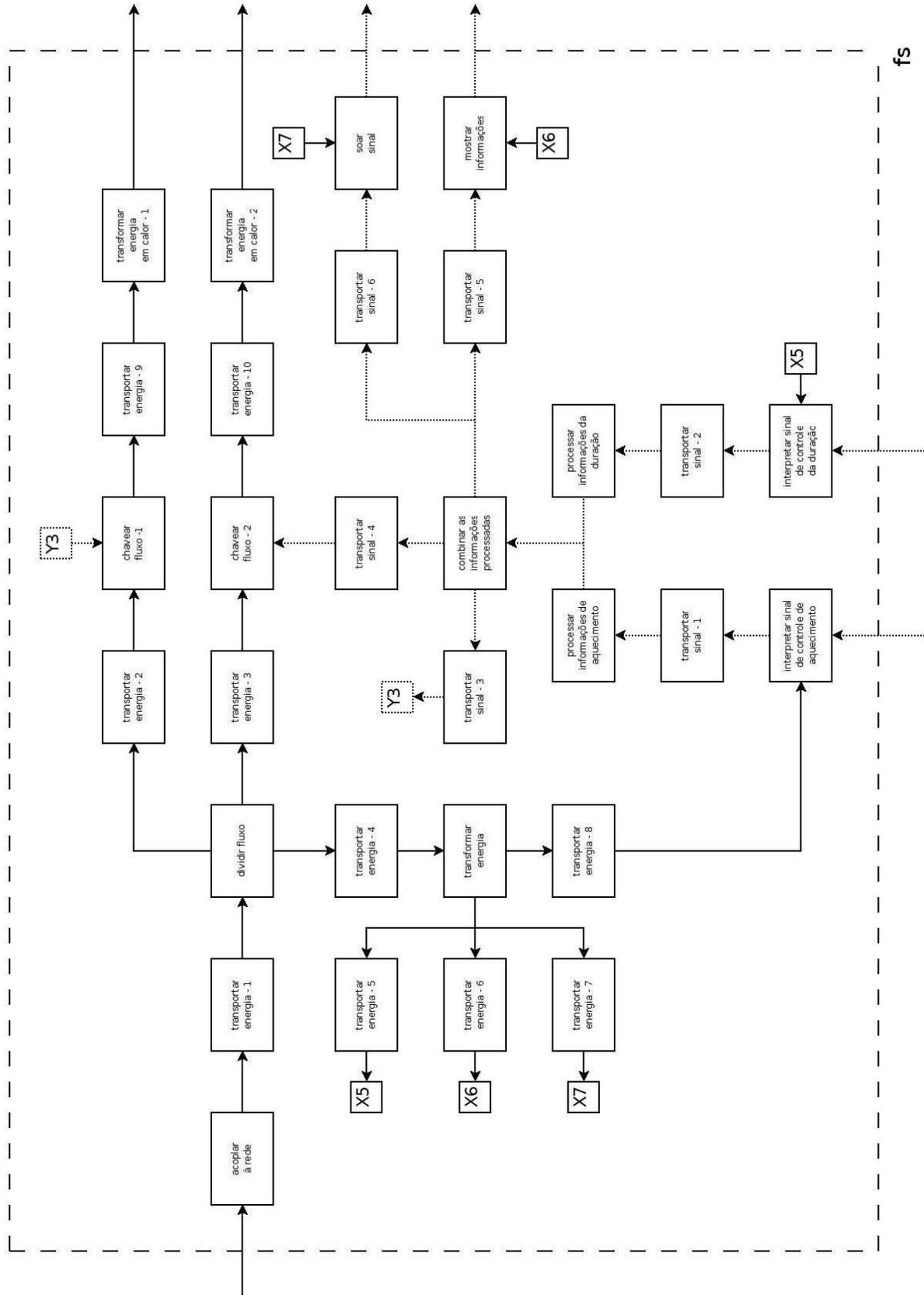


Figura 6.11 – Estrutura de Funções para o sistema de aquecimento e controle dos mini fornos

os produtos com estes níveis de atributos. A variação dos demais atributos influenciam o número de variações funcionais necessárias para gerar a diversidade de produtos desejada. A formalização da transformação destas variações de atributos em variações funcionais pode ser vista na Figura 6.14. Os campos desta ferramenta de acoplamento são preenchidos considerando-se as análises descritas nos próximos parágrafos.

O atributo capacidade influencia fortemente o transporte de energia até o ponto onde ela será transformada em calor. Como a família de fornos é definida por 2 volumes diferentes, são necessárias 2 variações destas funções (variações de comprimento do condutor). Uma variação para o mini forno de volume 8 litros e uma variação para os demais mini fornos de volume 9 litros. As funções 12, 14, 15, 16, 25, 26, 27 e 29 são influenciadas de forma fraca por este atributo e não se faz necessário variações destas funções para gerar a variedade desejada. As demais funções não são influenciadas por este atributo.

O atributo controle pode variar em 2 níveis na família de mini fornos elétricos. Em 2 produtos da família este atributo está presente e em 1 está ausente. A presença, ou não, deste atributo influencia fortemente as funções 17, 18, 19, 20, 24, 25 e 26. As funções de 1 até 13 são influenciadas de forma fraca ou média por este atributo (o fluxo poderia manter-se inalterado sem divisão, haja vista que o controle de aquecimento não está presente).

O atributo *layout* diferencia um integrante da família dos demais. Um dos integrantes tem *layout* vertical, os demais horizontal. A diferença de *layout* influencia fortemente as funções de transporte de energia e sinal do sistema de aquecimento e controle, funções 6, 10, 14, 15, 16, 17, 25, 26, 27 e 29. Para as demais funções a influência não é forte o suficiente para que sejam necessárias variações funcionais para formar a família de produtos.

Finalizando, para gerar a família de produtos são necessárias 2 variações das funções 6 e 10. Estas variações acomodam tanto as 2 variações necessárias para a capacidade como as 2 variações necessárias para *layout*, haja vista que o produto com capacidade de 8 litros tem *layout* vertical e os demais produtos tem capacidade de 9 litros e *layout* horizontal. As funções f14, f15, f16 e f17 devem ter 2 variações funcionais para se adequarem aos dois *layout* distintos da família de produtos. As funções 18, 19 e 20 não precisam de variações, pois elas estão presentes em 2 integrantes da família e ausente em 1. A função 24 pode ser simplificada para um dos produtos da família (o integrante sem controle de aquecimento), portanto 2

6.6 O PROCESSO DE MODULARIZAÇÃO DA ARQUITETURA

Com as informações apresentadas nas seções anteriores, o processo de modularização da arquitetura proposto neste trabalho pode ser empregado. A escolha da alternativa de arquitetura mais adequada para a família de produtos é baseada na métrica e nos Algoritmos Genéticos, conforme foi apresentado no Capítulo 5. As informações necessárias para a execução do algoritmo são: a descrição funcional dos produtos da família, Figura 6.14; as relações entre as funções, Figuras 6.11, 6.12 e 6.13; as estimativas assumidas dos custos relativos de desenvolvimento das funções (e suas variações), quadro da Figura 6.15; as estimativas assumidas dos custos relativos de preparação e montagem das interfaces de energia e sinal entre as funções, Figura 6.16; e os coeficientes α e β considerados, neste exemplo de aplicação iguais à unidade.

Variação	FUNÇÕES/ESTIMATIVA DOS CUSTOS RELATIVOS DE DESENVOLVIMENTO																													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	3	2	4	2	5	2	6	2	5	2	6	2	5	2	2	2	2	5	1	4	5	1	4	3	1	1	1	6	1	4
2	-	-	-	-	-	2	-	-	-	2	-	-	-	2	2	2	2	5	1	4	-	-	-	3	1	1	1	-	1	-

Figura 6.15 – Estimativa relativa dos custos de desenvolvimento das funções

Estimativa do Custo Relativo de Preparação e Montagem	Tipo de Interface		
	Material	Energia	Sinal
	0	2	1

Figura 6.16 – Estimativa relativa dos custos de preparação e montagem das interfaces

No processo de modularização da arquitetura, o algoritmo descrito no Capítulo 5 foi executado 5 vezes e os resultados obtidos são mostrados na Tabela 6.5. Em cada uma das vezes que o algoritmo foi executado foram mantidas: a população para evolução em 10.000 indivíduos; avaliação dos indivíduos mais adaptados por torneios com 15 integrantes; toda a população da geração seguinte era obtida por cruzamentos; e taxa de mutação de 50%, ou seja, 5.000 indivíduos da nova geração sofriam mutações. O critério para o encerramento do processo evolutivo é o da estabilização do indivíduo melhor avaliado da população durante 40

gerações.

Tabela 6.5 – Resultados obtidos para a definição da arquitetura da família de produtos

Evolução	Tempo de Execução [s]	Menor Custo Estimado
A	50.692,62	0,98865215
B	121.171,93	1,16466438
C	50.874,56	0,98865215
D	121.040,85	1,16466438
E	50.260,71	0,98865215
média	78.808,13	1,05905704

O processo de evolução mostrou-se estável, em 3 das 5 vezes que foi executado resultou no mesmo menor custo estimado e arquitetura para a família de produtos. O comportamento da evolução da arquitetura na direção do menor custo relativo estimado (segundo a métrica proposta no Capítulo 5) é mostrado na Figura 6.17. Ao final do processo evolutivo, o custo relativo estimado da arquitetura de enfoque modular sugerida é de 0,98865215. Neste custo estimado estão embutidos os custos de desenvolvimento e de preparação de interface e montagem, ambos também estimados.

Para a arquitetura sugerida, o custo estimado de desenvolvimento das funções corresponde a 66,67% do custo estimado do desenvolvimento individual das 3 alternativas de produtos (caso da adoção da arquitetura totalmente integral). Ainda para a arquitetura sugerida, o custo estimado de preparação da interface e de montagem é de 32,2% do estimado caso as funções fossem desenvolvidas separadamente (caso da adoção da arquitetura totalmente modular).

Caso fosse adotada a arquitetura totalmente integral para esta família de produtos, o custo estimado relativo total seria de 1,62460636. Este custo é o resultado da soma do custo de desenvolvimento, igual a unidade para o caso da arquitetura totalmente integral (maior custo possível entre as alternativas de arquitetura), e o custo de preparação de interface e montagem. O custo de preparação de interface e montagem é igual a 0,62460636. Caso a arquitetura totalmente modular fosse adotada, o custo total estimado para a família de produtos seria

1,42145594. Neste custo estão embutidos o custo de desenvolvimento de 0,42145594 e o custo de preparação de interface e montagem, igual a unidade (maior custo possível entre as alternativas de arquitetura).

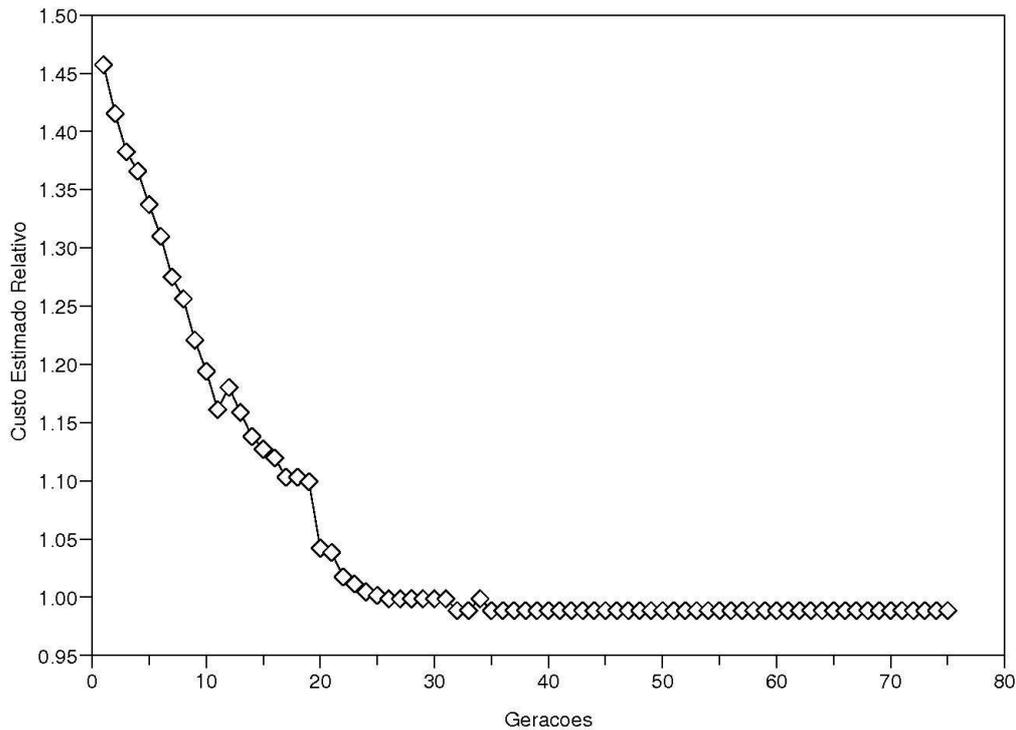


Figura 6.17 – Comportamento evolutivo dos custos estimados das alternativas de arquitetura

A alternativa de arquitetura obtida do processo de modularização é mostrada no quadro da Figura 6.18. Neste quadro podem ser vistos os 5 módulos formados. A composição de cada um destes módulos é ilustrada no quadro da Figura 6.18 pelos espaços abaixo das funções preenchidas por números diferentes de 0. Os números, diferentes de 0, indicam a variação da função para cada variação do módulo. O processo de modularização ilustrado sugere: 2 variações do módulo 1, 3 variações do módulo 2, 2 variações do módulo 3 e apenas 1 variação dos módulos 4 e 5. Ainda no quadro da Figura 6.18 podem ser vistas as quantidades destes módulos que devem ser fabricados para formar os produtos da família (quantidade estimada numa base anual de vendas).

MDL		FUNÇÕES																														QTD
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	109101
	b	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	2	2	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	49467
2	a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	58989
	b	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1	1	0	1	0	50112
	c	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	2	0	2	0	49467
3	a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	58989
	b	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	49467
4	a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	108456
5	a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	158568

Figura 6.18 – Arquitetura sugerida pelo processo evolutivo A

6.6.1 Interpretação dos Módulos Formados

A Figura 6.19 ilustra os módulos sugeridos no processo de modularização da arquitetura do sistema de aquecimento e controle da família de mini fornos elétricos. O primeiro módulo formado (módulo 1) agrupa as funções: 1-16, 21, 28 e 30. Para gerar as 3 alternativas de produtos da família este módulo deve ser fabricado em 2 variações. A variação 1a é empregada nos produtos P2 e P3 da família e a variação 1b é empregada no produto P1. Este módulo formou-se pelo agrupamento de todas as funções que trocam energia entre si, exceto a função de transporte de energia, f17, e a função de interpretação do sinal de controle de aquecimento, f18. O agrupamento destas funções em um módulo único é justificada pelo fato de ter sido adotado um peso relativo alto para o custo estimado de preparação de interface e montagem em relação ao custo estimado de desenvolvimento (1 para 1). Com este peso relativo, os ganhos potenciais de redução de custos estimados de preparação e montagem é significativo com a integração destas funções (potencialmente alta pois estas funções trocam, majoritariamente, energia entre si). A ausência das funções f17 e f18 neste macro-módulo deve-se ao fato destas funções não estarem presentes em uma das variações de produto desejada, produto P2.

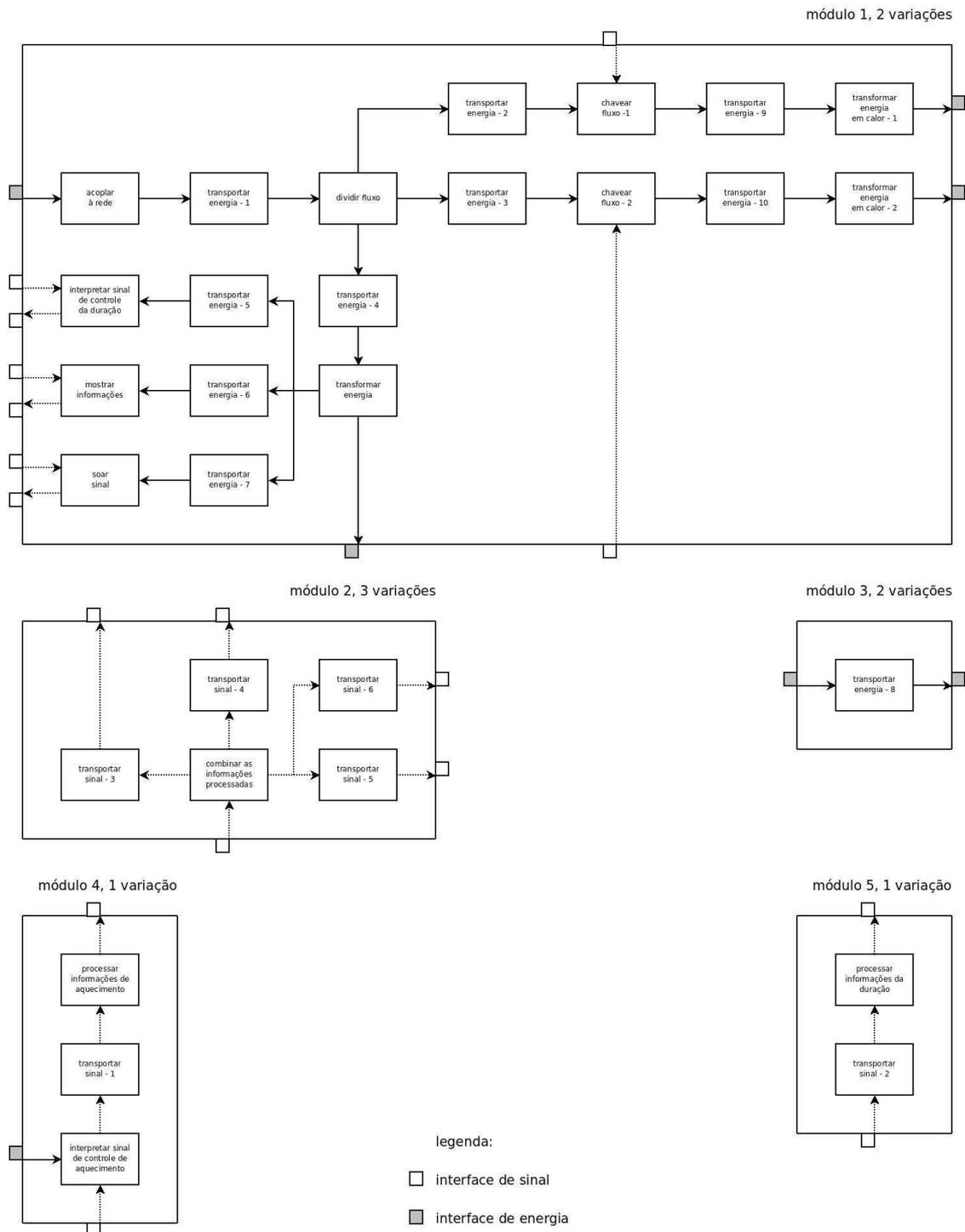


Figura 6.19 – Módulos formados pelo processo de modularização da arquitetura

O segundo módulo agrupa as funções: 24-27 e 29. Este módulo é formado por funções que trocam sinais entre si. Para formar os 3 produtos da família são necessárias 3 variações deste

módulo. A variação 2a é empregada no produto P3, a variação 2b é empregada no produto P2 e a variação 2c é empregada no produto P1. Novamente, devido ao peso relativo significativo dos custos estimados de preparação de interface e montagem, formou-se um módulo com várias funções. Mesmo admitindo que o custo de preparação de interface de sinal e sua montagem é menor que o custo para as interfaces de energia, o ganho o potencial com a integração destas funções suplanta o aumento do custo de desenvolvimento das 3 variações deste módulo.

O terceiro módulo sugerido pelo processo de modularização é definido por apenas uma função de transporte de energia, f17. Esta função está presente apenas nos produtos P1 e P3. A sugestão deste módulo, que troca energia com os demais módulos e que não pertence ao macro-módulo 1, deve-se ao fato que sua presença no módulo 1 acarretaria o desenvolvimento de 3 variações, no lugar de 2, do macro-módulo, aumentando consideravelmente os custos.

O quarto módulo é formado pelas funções f18, f19 e f20. Este módulo não tem variações e as funções que o definem trocam sinais entre si. A função f18 troca, além de sinal, energia com a função f17 (módulo 3). A função f18 não pertence ao macro-módulo1 pela mesma razão que a função f17. Seu agrupamento com as funções f19 e f20 forma um módulo único que está presente nas variações P1 e P3 dos produtos da família.

O último módulo sugerido, módulo 5, é definido por apenas 2 funções: f22 e f23. Estas funções trocam sinais entre si e são iguais para todos os produtos da família. O alto potencial de integração e o fato de não serem necessárias variações deste módulo justificam sua existência.

6.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O exemplo desenvolvido neste capítulo mostra que é possível definir de forma integrada a arquitetura e as configurações dos integrantes de uma família de produtos, ainda no início do processo de desenvolvimento de uma família de produtos. Informações preciosas como a dimensão da variedade da família para atingir um objetivo específico do fabricante e os atributos podem ser conhecidos antes do início do desenvolvimento técnico dos produtos. Não só as características da família de produtos que tenham sucesso no mercado segundo o critério

definido pelo fabricante, mas também a sugestão de uma arquitetura de enfoque modular que racionalize os custos de produção pode ser obtida seguindo o método desenvolvido neste trabalho.

A medição das preferências dos consumidores, como sugerida no Anexo B, mostrou-se adequada para uso em um simulador de mercado. O tratamento sugerido para estes dados em conjunto com o algoritmo evolutivo de busca das melhores configurações mostrou-se eficaz na definição das configurações dos produtos. O emprego do algoritmo de busca também mostrou-se flexível para definir as configurações dos integrantes da família de produtos de acordo com um objetivo específico do fabricante e em acordo com as preferências dos consumidores. Os casos de definição dos atributos contra a concorrência resultaram sempre (de acordo com o simulador de mercado) em participações de mercado relativamente altas dos produtos configurados.

Ao empregar a ferramenta de acoplamento sugerida nesta tese é possível espelhar as variações de configurações dos produtos definidas pelas preferências dos consumidores nas funções do sistema que se deseja modularizar a arquitetura. Ainda de acordo com o método desenvolvido, pode-se, a partir de modelos relativamente simples dos sistemas, aplicar o processo de modularização da arquitetura sugerido nesta tese. O processo de modularização para o sistema de aquecimento e controle do exemplo de aplicação resulta em uma alternativa de arquitetura de enfoque modular que, de acordo com a métrica sugerida, em um custo relativo estimado baixo quando comparados com o desenvolvimento de alternativas totalmente integral ou modular para o sistema (na média redução de cerca de 50%).

A aplicação sugerida do método também evidencia a importância das escolhas dos desenvolvedores da família de produtos no emprego do método. A primeira escolha que deve ser salientada está ligada à medição das preferências dos consumidores. Escolhas equivocadas dos atributos (e seus níveis) representativos dos produtos de um determinado segmento de mercado (ou a falta deles) no formulário de medição pode comprometer a simulação de participação de mercado entre as configurações de produtos. Na transformação entre os domínios funcional e dos atributos dos produtos, os desenvolvedores devem dar atenção especial a última fase da transformação sugerida pela ferramenta de acoplamento. Nesta fase deve-se decidir quais são as variações funcionais de cada integrante da família de produtos a

partir das variações de cada função do sistema necessárias para atender a diversidade de atributos da família.

Para o processo de modularização da arquitetura é necessário que o modelo de sistema esteja disponível, assim como os pesos relativos estimados para o custo de desenvolvimento das funções e para custo da preparação e montagem das interfaces. Por fim, é necessário que sejam conhecidos os pesos relativos (coeficientes α e β) destes custos na composição do custo total estimado. Quanto mais próximos estejam estes pesos dos custos relativos reais, obviamente, de melhor qualidade é a arquitetura sugerida pela aplicação do método proposto. Ou seja, o comprometimento dos desenvolvedores de alimentar o método com as informações necessárias precisas é determinante para que sejam obtidas uma arquitetura de enfoque modular e os atributos de uma família de produtos que sejam confiáveis. Porém, mesmo com conhecimento limitado sobre um segmento de mercado e sobre o processo de fabricação dos produtos, é possível aplicar o método desenvolvido para obter informações relevantes, ainda no início do processo de desenvolvimento, para o sucesso de uma família de produtos junto aos consumidores mantendo seus custos sob controle.

7 CONCLUSÕES

Ao longo do desenvolvimento desta tese, as conclusões sobre cada um dos tópicos abordados foram apresentadas em seus respectivos capítulos. Este capítulo final é dedicado à síntese das conclusões da tese desenvolvida. Na primeira seção deste capítulo os objetivos específicos do trabalho são confrontados com as propostas desta tese e os resultados de sua aplicação. Na seção final do capítulo são resumidas as conclusões gerais do trabalho e são propostos tópicos para trabalhos futuros.

7.1 CONCLUSÕES ESPECÍFICAS

Ao serem definidos os objetivos específicos da tese, a medição das preferências dos consumidores não foi listada entre eles. Porém, durante o desenvolvimento do trabalho (e para contornar as dificuldades da aplicação das abordagens disponíveis na literatura) necessitou-se desenvolver uma abordagem híbrida para a medição das preferências dos consumidores. Duas características principais diferenciam esta abordagem das abordagens tradicionais. A abordagem híbrida proposta para medir as preferências dos consumidores permite que o formulário para medição seja definido de antemão (em oposição à Análise Conjunta Adaptativa) e a parcela compositiva seja oriunda de comparações sugeridas entre as configurações de produtos (diferente da Análise Conjunta Híbrida que propõe o ordenamento das configurações). Estas características particulares tornam o processo de medição das preferências prático para o pesquisador e objetivo para o entrevistado. O emprego desta abordagem possibilitou a medição coletiva (ou individual) das preferências dos potenciais consumidores de mini fornos elétricos sem o auxílio de equipamento de apoio (computadores). O tempo médio de medição (composto de explicação da abordagem e do levantamento das preferências) é de 30 minutos para um indivíduo ou grupo de indivíduos. Por fim, cerca de 3% das preferências medidas coletivamente foram descartadas porque o formulário foi preenchido de forma incorreta (o que indica que depois de explicada, poucos indivíduos não compreenderam a abordagem proposta).

Além do desenvolvimento da abordagem híbrida de medição mencionada no parágrafo

anterior, no Capítulo 1 da tese foram identificados os objetivos específicos que deveriam ser atingidos para implementação do Método para Auxiliar as Escolhas das Configurações e de uma Arquitetura de Enfoque Modular para Famílias de Produtos. Nas próximas subseções, as conclusões para cada um destes objetivos específicos são apresentadas.

7.1.1 Integração das Abordagens

A integração, em um método, de duas atividades do processo de desenvolvimento de novos produtos que são realizadas, tradicionalmente, de forma independente foi estabelecido como o primeiro objetivo específico da tese. O método para definição das configurações de uma família de produtos e sua arquitetura permite vincular as necessidades dos consumidores por produtos variados com as vantagens do desenvolvimento dos produtos da família com enfoque modular.

Na integração sugerida entre estas atividades, os produtos da família são descritos tanto da perspectiva de seus atributos como de suas funções. O acoplamento entre as descrições dos produtos, segundo estas perspectivas, reflete a variedade de atributos desejada pelos consumidores no número de variações funcionais que devem ser desenvolvidas pelos fabricantes. Neste trabalho, os consumidores, representados pelas preferências medidas, definem diretamente os atributos dos integrantes da família de produtos. As únicas interferências de terceiros são: a escolha dos atributos (e seus níveis) para medição das preferências; o processo de tratamento das informações de preferências; e a escolha do grupo de pesquisados que representam o comportamento do mercado. Eliminar a eventual sobreposição das preferências do desenvolvedor às preferências dos consumidores é uma vantagem da definição dos atributos da família de produtos de acordo com o procedimento proposto.

A escolha de uma arquitetura de enfoque modular para a família de produtos cujas variações funcionais espelham com fidelidade a variedade de produtos desejada pelos consumidores e a definição dos agrupamentos funcionais (posteriormente desenvolvidos como componentes) para que o custo estimado seja mínimo permite ganhos tanto no aumento da participação de mercado (ou receita, ou lucro, ou satisfação) como na redução dos custos de desenvolvimento

e produção. Segundo a integração proposta, os consumidores definem o que deve ser produzido e a racionalização da arquitetura define como as funções devem ser executadas pelos componentes dos produtos.

7.1.2 Ferramenta de Acoplamento

O ponto crítico da operacionalização da integração entre as abordagens configuracional e de arquitetura é o acoplamento entre os domínios de descrição dos produtos. O desenvolvimento de uma ferramenta para auxiliar neste acoplamento é um dos objetivos específicos do trabalho. O acoplamento proposto é obtido pela coerência entre a descrição dos produtos pelos seus atributos e a descrição dos produtos pelas suas funções. A ferramenta proposta de formalização do acoplamento entre estas descrições sistematiza a operação de transformação, porém ainda é dependente do julgamento dos desenvolvedores. De qualquer maneira, o uso da ferramenta de acoplamento proposta força os desenvolvedores seguirem um caminho lógico reduzindo a possibilidade de incoerências entre as descrições dos produtos nestes dois domínios.

7.1.3 Métrica para Avaliação das Alternativas de Arquitetura

A definição da arquitetura ainda é uma ação de risco quando se trata de escolher uma alternativa, entre muitas, de como os componentes executam as funções dos produtos. A escolha do mapeamento (entre as funções dos produtos e seus componentes) não pode, obviamente, ser feita depois que os componentes sejam criados. Esta é uma escolha que deve ser feita em etapas anteriores quando as informações sobre os produtos são escassas, daí sua dificuldade. Um dos objetivos específicos deste trabalho trata deste tema particular ao propor uma métrica de auxílio à definição de uma arquitetura de enfoque modular para famílias de produtos (da perspectiva do mapa função-componente) para ordenamento das alternativas de menor custo relativo estimado.

A proposta desta tese apresenta uma vantagem em relação às abordagens tradicionais do processo de modularização dos produtos que é a possibilidade do ordenamento das

alternativas de arquitetura de enfoque modular. Este ordenamento é possível porque o problema é tratado de forma semi-quantitativa. Formulada segundo premissas (heurísticas), a métrica de avaliação estima um custo relativo para cada alternativa possível de arquitetura de enfoque modular. O uso da métrica não depende de conhecimentos profundos do processo de desenvolvimento e fabricação dos produtos, haja vista que as informações diferenciais necessárias para sua aplicação estão na forma de pesos (porém algum conhecimento do comportamento dos custos estimados, mesmo que superficial, é necessário). Os pesos que representam os custos de desenvolvimento das funções ou de preparação e montagem das interfaces e os coeficientes, porém, (α e β) devem ser escolhidos com prudência, mesmo que algumas arquiteturas apresentem baixa sensibilidade a estas escolhas.

Outro ponto que deve ser destacado na métrica de custos formulada para o ordenamento das alternativas de arquitetura é o fato dela ter sido criada especificamente para famílias de produtos. Não se trata de uma adaptação dos métodos tradicionais, geralmente propostos para modularização de apenas 1 produto. Esta característica é importante e permite a inserção de variáveis específicas às famílias de produtos como as variações funcionais necessárias para formação da família e seus custos estimados de desenvolvimento. Apesar do ordenamento das possíveis alternativas de arquitetura de acordo com as estimativas de custos segundo a métrica proposta, isto só pode ser feito para famílias de produtos que executam poucas funções. Para famílias de produtos que executam muitas funções, a métrica proposta deve ser utilizada para comparações entre alternativas de arquitetura pré-selecionadas ou, então, para uso conjunto com um processo de busca.

7.1.4 Emprego de Métodos Evolutivos Computacionais

Outro objetivo específico do trabalho é aplicar métodos evolutivos computacionais de auxílio à escolha tanto da arquitetura como dos atributos da família de produtos (definindo cromossomos e operações, bem como implementado os passos dos Algoritmos Genéticos). A escolha dos Algoritmos Genéticos mostrou-se adequada para esta tarefa em ambos casos. Na definição dos atributos dos integrantes da família de produtos sua aplicação é quase direta, não é necessário que sejam definidos cromossomos ou operações originais para este problema

específico. Por outro lado, a aplicação deste procedimento de busca à escolha de uma arquitetura de enfoque modular para famílias de produtos depende de definições originais para os cromossomos representativos dos indivíduos e das operações de cruzamentos e mutações.

Os resultados obtidos do emprego dos Algoritmos Genéticos à definição dos atributos dos produtos foram muito bons, principalmente quando se reconhece que as configurações são obtidas, na maioria dos casos, contra a concorrência. Ou seja, apesar do método não garantir que as configurações obtidas resultem no máximo absoluto de uma função objetivo, o comportamento evolucionário do método mostrou que as configurações caminham no sentido de maximizar esta função. Nos casos estudados, além de serem obtidas configurações para os produtos muito boas sob as várias perspectivas analisadas (satisfação dos consumidores, parcela de mercado, receita ou lucro), os tempos de processamento foram baixos. Mesmo utilizando um código escrito em linguagem interpretativa para implementação dos Algoritmos Genéticos, o tempo consumido nas evoluções nunca foi um fator limitador, obtendo-se as configurações dos produtos em questão de minutos para problemas simples e horas para problemas complexos (muitas informações de consumidores, concorrentes, etc.).

Podem ser tiradas conclusões semelhantes da aplicação dos Algoritmos Genéticos ao problema da definição de uma arquitetura de enfoque modular para famílias de produtos. Em todos os casos estudados o comportamento evolucionário foi no sentido de minimizar o custo estimado, segundo a métrica desenvolvida, da alternativa de arquitetura de enfoque modular para a família de produtos. A abordagem para seleção de uma arquitetura de enfoque modular sugerida nesta tese mostrou habilidade para, a partir de um conjunto aleatório de arquiteturas (de enfoque modular), evoluir para alternativas de arquitetura com menor custo estimado relativo. Devido à complexidade do problema, o fato das arquiteturas obtidas pelo processo de seleção serem coerentes (no teste proposto a arquitetura obtida foi a arquitetura esperada e no exemplo de aplicação não houve nenhuma discrepância gritante nos módulos formados) é sinal de efetividade do processo de escolha. Deve-se salientar, também, que o processo de escolha sugerido é independente da métrica heurística de custos e pode ser empregado em conjunto com qualquer outra função objetivo.

Ao contrário da aplicação dos Algoritmos Genéticos ao problema da definição dos atributos, sua aplicação na definição da arquitetura de enfoque modular para uma família de produtos

não é direta. Para que a evolução ocorra na direção de uma arquitetura de baixo custo estimado, a definição do cromossomo e as operações de cruzamento e, principalmente, mutação não são convencionais. A evolução para arquiteturas de baixos custos estimados obtidas da aplicação dos Algoritmos Genéticos deve-se em grande medida à definição de um operador mutação que prevê a aglutinação ou a partição dos módulos.

Apesar dos resultados obtidos do processo evolutivo indicarem alternativas de arquitetura de enfoque modular para a família de produtos, o processo é muito custoso da perspectiva do tempo consumido. Para famílias de produtos que executam entre 20 e 30 funções, por exemplo, o tempo consumido no processo evolucionário é medido em (fração de) dias. Devido à forma do crescimento do número de alternativas de arquiteturas de enfoque modular para uma família de produtos, imagina-se que o tempo gasto na evolução das alternativas de arquitetura, na direção daquelas de menor custo, para sistemas com mais de 50 funções seja suficientemente grande a ponto de inviabilizar a aplicação deste método de busca como proposto. O transporte do código para uma linguagem de baixo nível (compilável), a melhora do código, e a adoção de uma população inicial selecionada de alternativas de arquiteturas de enfoque modular para a família de produtos devem reduzir o tempo de execução do processo evolucionário e permitir o emprego do procedimento de escolha de uma arquitetura de enfoque modular para sistemas maiores.

7.1.5 Aplicabilidade do Método Desenvolvido

O exemplo de aplicação apresentado no Capítulo 6 mostra que os atributos e a arquitetura de enfoque modular de uma família de eletroportáteis podem ser definidos empregando o método proposto nesta tese. Pode-se concluir que resultados semelhantes podem ser obtidos para famílias de produtos de outros segmentos de mercado. Aliás, pode-se imaginar que resultados ainda melhores podem ser obtidos quando as limitações acadêmicas para operacionalização do método sejam eliminadas. A possibilidade de consultar um número maior de potenciais consumidores adiciona confiabilidade estatística às estimativas de participação de mercado das configurações dos produtos. Assim como a familiaridade com o desenvolvimento de produtos semelhantes deve resultar em melhores estimativas para os pesos e coeficientes

empregados na métrica derivada nesta tese, elevando a chance de redução dos custos de desenvolvimento e produção com a adoção de uma arquitetura de enfoque modular para a família de produtos.

7.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Nesta seção, as conclusões redigidas ao longo da tese e em especial nas seções anteriores deste capítulo são resumidas. Este resumo é composto de 5 pontos conclusivos, listados a seguir:

- O método permite definir de maneira integrada as configurações e uma arquitetura de enfoque modular para famílias de produtos. A ferramenta de integração proposta desempenha um papel fundamental na integração, haja vista que mantém coerentes as descrições dos produtos nos 2 domínios abordados pela tese;
- A abordagem de medição híbrida apresentada permite eliminar as características indesejadas das abordagens tradicionais (frente as limitações enfrentadas para medir as preferências dos consumidores): ordenamento das alternativas de configurações dos produtos e uso de equipamentos para suporte à medição;
- Com a métrica heurística formulada pode-se ordenar e escolher as alternativas mais interessantes de arquiteturas de enfoque modular para famílias de produtos da perspectiva de seus custos diferenciais estimados. A métrica também permite quantificar as vantagens comparativas oriundas da adoção de uma arquitetura particular. Seu emprego é independente da interpretação dos projetistas e utilizando os mesmos modelos, pesos e coeficientes espera-se que uma arquitetura comum seja obtida, independente do desenvolvedor;
- O emprego de algoritmos evolutivos como processo de escolha, tanto das melhores configurações como da arquitetura de enfoque modular para famílias de produtos, mostrou-se adequado. Os cromossomos, combinações e mutações sugeridos nesta tese resultaram em configurações que maximizam o objetivo previamente definido pelo fabricante e minimizam o custo estimado relativo da alternativa de arquitetura;

- O exemplo de aplicação mostra que empregando o método desenvolvido nesta tese pode-se definir tanto as configurações como uma arquitetura de enfoque modular para uma família de mini fornos elétricos. Sem nenhuma grande limitação aparente, o método, por extensão, poderá ser empregado para definir as configurações e uma arquitetura de enfoque modular para outras famílias de produtos.

Antes de finalizar o trabalho, pode-se apresentar os seguintes tópicos identificados para investigação futura: a) qual a importância da amplitude das diferenças de utilidade entre configurações de produtos na escolha dos consumidores; b) formas para estimar os custos de desenvolvimento das funções dos produtos, suas variações, e os custos de preparação das interfaces e montagem; c) quais populações de alternativas de arquitetura de enfoque modular favorecem a evolução para a alternativa de menor custo em menos tempo; d) como formar módulos combinando a abordagem proposta (agrupamento de funções) com abordagens de agrupamento das partes dos produtos; e e) como utilizar a estrutura desenvolvida para outras funções objetivo.

Finalmente, pode-se concluir que o objetivo geral estabelecido no início desta tese foi alcançado. A teoria proposta nos capítulos anteriores, apesar de complexa, provou-se aplicável. Os atributos e a arquitetura de uma família de produtos industriais podem ser obtidos com a aplicação do método desenvolvido. As informações obtidas no exemplo de aplicação do método mostram que, mesmo nos estágios iniciais do desenvolvimento, é possível definir as configurações dos produtos e a arquitetura da família segundo critérios claros, tanto da perspectiva das configurações preferenciais do mercado como da racionalização dos componentes para a produção.

REFERÊNCIAS

- AAKER D.A., KUMAR, V., DAY, G.S., **Pesquisa de Marketing**, 2º ed., Editora Atlas, São Paulo, 2004.
- ASAN, U., POLAT, S., SERDAR, S., An Integrated Method for Designing Modular Products, **Journal of Manufacturing Technology Management**, v.15, n.1, p.29-49, 2004.
- BALAKRISHNAN, P.V., JACOB, V.S., Genetic Algorithms for Product Design, **Management Science**, v.42, n.8, p.1105-1117, 1996.
- BALDWIN, C. Y., CLARK, K. B., **The Option Value of Modularity in Design** (An Example from Design Rules, Volume 1: The Power of Modularity), Harvard Business School, 2002.
- BELLONI, A., FREUND, R., SELOVE, M., SIMESTER, D., **Optimizing Product Line Designs: Efficient Methods and Comparisons**, MIT Sloan School of Management, Cambridge, 2005.
- BAUER, H. H., HERMANN, A., MENGEN, A., A Method of Achieving Maximum-Profit Product Design on the Basis of Conjoint Measurement, **Pricing Strategy & Practice**, v.4, n.1, p.28-33, 1996.
- BRABAZON, T., MATTHEWS, R., Product Architecture and Product Design: A Complexity Perspective, **Journal of American Academy of Bussiness**, v.2, n.2, p.472-478, 2003.
- BROWNING, T.R., Applying the Design Structure Matrix to System Decomposition and Integration Problems: A Review and New Directions, **IEEE Transactions on Engineering Management**, v.48 , n.3, p.292-306, 2001.
- BRUDERER, E., SINGH, J.V., Organizational Evolution, Learning, and Selection: A Genetic-Algorithm-Based Model, **Academy Management Journal**, v.39, n.5, p.1322-1349, 1996.
- CARRAFA, W.M., **Desenvolvimento de um máquina transplantadora para pequenas propriedades rurais utilizando uma abordagem de projeto de sistemas modulares**. Florianópolis, 2002. 220 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

COLQUHOUN G. J., BAINES R. W., CROSSLEY R., A state of the art review of IDEF0, **Journal International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v.6, n.4, p.252 – 264, 1993.

DAHMUS, J.B., GONZALES-ZUGASTI, J.P., OTTO, K.N., Modular Product Architecture, **Design Studies**, v.22, n.5, p.409-424, 2001.

DICKAU, R.M., **Mathematical Figures Using Mathematica**, acesso em setembro de 2006, disponível em <http://mathforum.org/advanced/robertd/index.html>.

DOVE, D.W., BACHELDER, E.L., Matching Product Features with Costumer Needs, **Bank Marketing**, v.22, n.3, p.33-36, 1990.

ERENS, F., VERHULST, K., Architectures for Product Families, **Computers in Industry**, v.33, p.165-178, 1997.

ERIXON, G., Modular Function Deployment (MFD), Support for Good Product Structure Creation, **2nd WDK Workshop on Product Structuring**, Delft – The Netherlands, June, 1996.

FISHER, M., KAMALINI, R., ULRICH, K., Component Sharing in the Management of Product Variety: A Study of Automotive Braking Systems, **Management Science**, v.45, n.3, p.297-315, 1999.

FIXSON, S.K., The Multiple Faces of Modularity – A Literature Analisis of a Product Concept for Assembled Hardware Products, **Technical Report – Industrial and Operations Engineering – University of Michigan**, 2003.

GOLDSBY, R.A., **Basic Biology**, Harper's College Press, New York, 1976.

GONÇALVES, J., **Otimização de Parâmetros de Atrito de Sistemas de Freio Usando Algoritmos Genéticos**, Florianópolis, 2004. 179 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

GREEN, P.E., GOLDBERG, S.M., MONTEMAYOR, M., A Hybrid Utility Estimation Model for Conjoint Analysis, **Journal of Marketing**, v.45, n.1, p.33-41, 1981.

GREEN P.E., KRIEGER, A.M., A Costumer-Based Approach to Designing Product Line Extensions, **Journal of Product Innovation Management**, v.4, p.21-32, 1987.

GREEN P.E., RAO, V.R., Conjoint Measurement for Quantifying Judgmental Data, **Journal of Marketing Research**, v.8, n.3, p.355-363, 1971.

GREEN, P.E., SRINIVASSAN, V., Conjoint Analysis in Marketing: New Developments With Implications for Research and Practice, **Journal of Marketing**, v.54, n.4, p.3-17, 1990.

HÖLTTÄ-OTTO, K., **Modular Product Platform Design**, Helsinki, 2005. 65 f., Doctoral Dissertation – Helsinki University of Technology, Department of Mechanical Engineering, Machine Design.

HUANG, C-C, KUSIAK, A., Modularity in Design of Product Systems, **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans**, v.28, n.1, p.66-77, 1998.

IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA), **Tabela Produção e Vendas dos Produtos e/ou Serviços Industriais, Segundo Classe de Atividades e Descrição dos Produtos**, Brasil, 2005.

JOSE, A., TOLLENAERE, M., Modular and Platform Methods for Product Family Design: Literature Analysis, **Journal of Intelligent Manufacturing**, v.16, p.371-390, 2005.

KOTLER, P., From Mass Marketing to Mass Customization, **Planning Review**, v.17, n.5, p.10-13, 1989.

KRENG, V.B., LEE, T., Modular Product Design with Grouping Genetic Algorithm – A Case Study, **Computers and Industrial Engineering**, v.46, p.443-460, 2004.

LAKSHMIKANTHA, K.S., SHRIDHAR, T.N., SRIDHARA, B.K., SREEKANTA GUPTA, B.P., Application of Conjoint Analysis in New Product Development, **Proceedings of the National Conference on Product Development with Mechatronic Systems for Global Quality, PMGQ 2005**, May 2-3, p.33-37, 2005.

LASSENIOUS, C., SOININEM, T., VANHANEN, J., Constructive Research, **Methodology Workshop**, Helsinki University of Technology, November 26, 2001.

MAANZ (THE MARKETING ASSOCIATION OF AUSTRALIA AND NEW ZEALAND), **Dictionary of Marketing Terms**, acesso em maio de 2008, disponível em <http://www.marketing.org.au/glossaries.aspx>.

McCLAVE, J.T., SINCICH, T., **Statistics**, 8th ed., Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ,

MARIBONDO, J.F., **Desenvolvimento de uma metodologia de projeto de sistemas modulares, aplicada a unidades de processamento de resíduos sólidos domiciliares.** Florianópolis, 2000. 277 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.

MAZETTO, G.M., **Desenvolvimento de um sistema modular para mecanização agrícola conservacionista em pequenas propriedades.** Florianópolis, 2000. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

MOORE, W.L., Levels of Aggregation in Conjoint Analysis: An Empirical Comparison, **Journal of Marketing Research**, v.17, n.4, p.516-523, 1980.

MILLER, J.T., OGDEN, J.R., LATSHAW, C.A., Using Trade-off Analysis to Determine Value-price Sensitivity of Custom Calling Features, **American Business Review**, v.16, n.1, p.8-13, 1998.

NAGLE, T.T., HOLDEN, R.K., **Estratégia e Tática de Preços – Um Guia para Decisões Lucrativas**, 3ª Ed., Pearson – Prentice Hall, São Paulo, 2003.

PAGE, A.L., ROSENBAUM, H.F., Redesigning Product Lines with Conjoint Analysis: How Sunbeam Does It, **Journal of Product Innovation Management**, v.4, p.120-137, 1987.

PAHL, G., BEITZ, W., FELDHUSEN, J., GROTE, K-H., **Projeto na Engenharia**, 1ª ed., Editora Edgard Blücher, São Paulo, 2005.

ROZENFELD, H., FORCELLINI, F.A., AMARAL, D.C., TOLEDO, J.C., SILVA, S.L., ALLIPRANDINI, D.H., SCALICE, R.K., **Gestão de Desenvolvimento de Produtos – Uma Referência para a Melhoria do Processo**, 1ª ed., Editora Saraiva, 2005.

SANDS, S., WARWICK, K., What Product Benefits to Offer to Whom – An Application of Conjoint Segmentation, **California Management Review**, v.24, n.1, p.69-74, 1981.

SAWHNEY, M. S., Leveraged High-variety Strategies: From Portfolio Thinking to Platform Thinking, **Journal of the Academy of Marketing Science**, v.26, n.1, p.54-61, 1998.

SCALICE, R.K., **Desenvolvimento de uma família de produtos modulares para o cultivo e beneficiamento de mexilhões.** Florianópolis, 2003. 252 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia

Mecânica.

SILVA, E. L. da, MENEZES, E. M., **Metodologia da Pesquisa e Elaboração da Dissertação**, 3ª ed., Laboratório de Ensino à Distância da UFSC, Florianópolis, 2001.

STONE, R.B., WOOD, K.L., CRAWFORD, R.H., A Heuristic Method to Identify Modules from a Functional Description of a Product, **Proceedings of DETC98 – Atlanta – Georgia**, 1998.

TESSAROLO, P., Conjoint Analysis Teoria ed Applicazioni, **Gestione Aziendale – Dipartimento di Tecnica e Gestioni dei Sistemi Industriali** – Università di Padova, 2004-2005.

ULRICH, K., The Role of Product Architecture in the Manufacturing Firm, **Research Policy**, v.24, p.419-440, 1995.

ULRICH, K., RANDALL, T., FISHER, M., REIBSTEIN, D., Managing Product Variety: A Study of the Bicycle Industry, **Managing Product Variety**, Kluwer, 1998.

WHITLEY, D., Genetic Algorithms and Evolutionary Computing, **Van Nostrand's Scientific Encyclopedia**, 2002.

YAMAMOTO, M., LAMBERT, D.R., The Impact of Product Aesthetics on the Evaluation of Industrial Products, **Journal of Product Innovation Management**, v.11, p.309-324, 1994.

YANG, T.G., BEITER, K.A., ISHII, K., Product Platform Development: Considering Product Maturity and Morphology, **Proceedings of IMECE2005**, Orlando – Florida – USA, 2005.

APÊNDICE A – Algoritmos Genéticos

As abordagens evolutivas, particularmente os Algoritmos Genéticos, podem ser empregados tanto na busca das melhores alternativas de configurações de produtos como na busca das melhores alternativas de arquiteturas de enfoque modular para famílias de produtos. Este apêndice destina-se a apresentação desta ferramenta e está organizado em 8 seções. A primeira seção revisa os conceitos dos processos evolutivos biológicos e a sua incorporação aos modelos computacionais. A segunda seção resume a terminologia usualmente adotada nos processos evolutivos. Seguem-se as seções dedicadas a codificação, avaliação, seleção, cruzamentos e mutações dos indivíduos de uma população. Por fim, a sétima seção apresenta o modelo NK e a complexidade do problema de desenvolvimento de produtos.

A.1 O PROCESSO EVOLUTIVO

Em 1809, o cientista francês Jean Baptiste de Lamarck propôs formalmente que a vida na terra evolui lenta e continuamente. Sua teoria evolucionária estava baseada na noção que os indivíduos têm uma necessidade interna de atingir a perfeição e as características que eles desenvolvem com sucesso neste sentido são herdadas por sua prole. Desta maneira, cada nova geração começa em uma posição melhor em relação à geração antecessora que, por sua vez, repassará suas próprias melhorias aos seus descendentes. Segundo Lamarck, um dos mecanismos de evolução dos indivíduos é o ‘uso ou desuso’ de alguma de suas características. Este tipo de arrazoado – que as necessidades dos indivíduos ou desejos podem resultar em alteração biológica herdável – é chamado de ‘Lamarckismo’ (GOLDSBY, 1976, p.317-318).

Quase cinquenta anos mais tarde, em 1858, Charles Darwin e Alfred Wallace, ambos independentemente, propuseram uma nova teoria para explicar como os organismos se adaptam, ao longo do tempo, ao seu ambiente. Esta teoria foi chamada de teoria da seleção natural. O famoso trabalho de Darwin, *The Origin of Species*, foi publicado em novembro do ano seguinte. A teoria da seleção natural estabelece que todas as espécies consistem de uma grande variedade de indivíduos, lutando por recursos limitados. Os organismos que herdam

características mais apropriadas para o ambiente onde vivem sobreviverão e sua reprodução será fértil. Como resultam mais descendentes dos organismos bem adaptados ao ambiente, eles aumentarão seu número nas gerações futuras (GOLDSBY, 1976, p. 318).

Recentemente, os princípios da teoria evolutiva de Charles Darwin e Alfred Wallace têm sido empregados na criação de ambientes virtuais e procedimentos de seleção de indivíduos. Os biólogos começaram a desenvolver simulações computacionais envolvendo modelos genéticos nas décadas de 1950 e 1960. A primeira aparição do termo Algoritmo Genético deu-se em 1967, numa publicação de J. D. Bagley sobre seu uso na programação de jogos de computador. Em 1971, R. B. Hollstien utilizou um Algoritmo Genético aplicado ao problema de otimização e publicou um trabalho chamado *Artificial Genetic Adaptation in Computer Control Systems*. Em 1975 foi publicado o livro *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, por J. Holland, considerado uma contribuição marcante para o desenvolvimento dos Algoritmos Genéticos (GONÇALVES, 2004, p.61).

Além dos Algoritmos Genéticos, podem ser incluídos na mesma família de modelos computacionais inspirados pela evolução: as Estratégias Evolutivas, a Programação Genética e a Programação Evolucionária. Os Algoritmos Genéticos e Evolutivos codificam a solução potencial de um problema específico numa estrutura de dados semelhante a organização cromossômica. Operadores de recombinação são aplicados sobre estas estruturas para preservar as informações críticas e operadores de mutação são aplicados para a alteração de soluções potenciais (WHITLEY, 2002).

A estrutura básica dos Algoritmos Genéticos é comum às várias áreas do conhecimento e pode ser resumida na aplicação de alguns passos. Por exemplo, para Bruderer e Singh (1996) os passos para a implementação dos Algoritmos Genéticos voltada para a solução dos problemas de evolução organizacional são:

Passo 1: Definição da população inicial.

Passo 2: Definição da função de adaptação (função objetivo).

Passo 3: Avaliação de cada integrante da população de acordo com a função de adaptação.

Passo 4: Criação de uma nova população a partir da população atual, repetindo os

seguintes dois passos até a que a nova população atinja o mesmo número de indivíduos da população atual:

Passo 4.1: Escolha aleatória de pares da população atual proporcionalmente ao seu nível de adaptação.

Passo 4.2: Aplicar os operadores genéticos de cruzamento e mutação aos pares escolhidos para gerar dois novos indivíduos da nova população.

Passo 5: Se o número de gerações estipulado foi atingido, pare o algoritmo; caso contrário, retorne ao passo 4.

O fluxograma de um Algoritmo Genético é apresentado na Figura A.1. Este fluxograma pode ser adaptado tanto para a busca das melhores alternativas para as configurações dos integrantes de uma família de produtos como para a definição de sua arquiteturas.

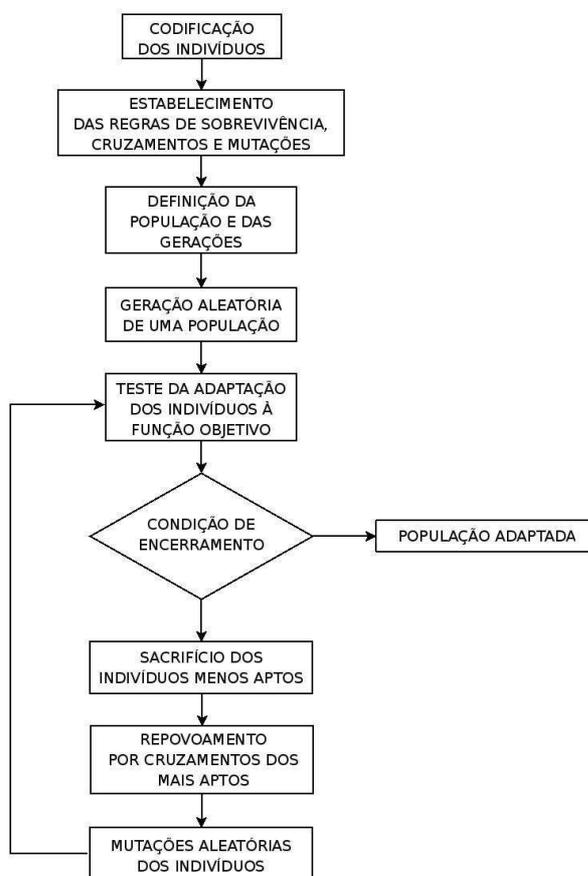


Figura A.1 – Fluxograma representativo de um Algoritmo Genético

A.2 TERMOS

Devido à origem na teoria da evolução das espécies, os Algoritmos Genéticos apropriam-se dos termos utilizados nas Ciências Biológicas. Os termos e seus significados originais deste ramo do conhecimento, utilizados com frequência na teoria dos Algoritmos Genéticos, são reproduzidos a seguir.

- A maior estrutura em todas as células eucarióticas é o *núcleo*. Ele contém o material genético DNA, que determina a ação potencial das células em todos os seus processos vitais. O *núcleo* é limitado por uma membrana chamada envelope nuclear e contém um nucleoplasma granular. Nos nucleoplasmas existem dois tipos principais de estruturas: os cromossomos e os nucléolos. Os cromossomos carregam o DNA (GOLDSBY, 1976, p. 20).
- Mendel propôs que cada característica de um indivíduo é determinado por duas partículas, ou genes. Um gene é originário do gameta masculino, o outro do gameta feminino. Ele viu que para cada característica podem existir diferentes genes (alelos) que causam diferentes expressões nesta característica (GOLDSBY, 1976, p. 69). É conhecido que os genes estão localizados nos cromossomos no núcleo das células. Cada gene tem seu lugar específico (locus) em cromossomos específicos (GOLDSBY, 1976, p. 71).
- Uma população é definida como uma comunidade de indivíduos provenientes de relações sexuadas em dada localidade. Para efeitos de estudo evolutivo, cada um dos indivíduos sexualmente maduros de uma população está apto para procriar com indivíduos de sexo oposto (cruzamentos) e gerar descendentes (GOLDSBY, 1976, p. 320).
- A mensagem genética do DNA, afortunadamente, é, usualmente, repassada inalterada de geração em geração. Porém, mudanças espontâneas nos genes podem ocorrer. Estas mudanças são chamadas mutações. Como nestes casos o material genético foi alterado, a mudança será herdada pelos descendentes (GOLDSBY, 1976, p.97).
- Dois indivíduos de uma população gerados sexualmente não podem ser idênticos, à exceção dos gêmeos monozigotos. Nas populações de plantas ou animais, a maioria

dos indivíduos manterá uma combinação única de genes chamada genótipo. Cada um é diferente de qualquer outro genótipo na população. Se o genótipo afetar o tamanho, forma, ou alguma outra característica visível ou mensurável, o organismo terá, também, uma aparência única, ou fenótipo (GOLDSBY, 1976, p. 320).

A.3 CODIFICAÇÃO DOS INDIVÍDUOS E AVALIAÇÃO DA ADAPTAÇÃO

Na codificação das populações de um problema de otimização funcional baseados em AG's, são utilizados tanto valores reais como seqüências de *bits* e nos problemas de otimização combinatória, são utilizadas codificações baseadas na permutação (WHITLEY, 2002). Para ilustrar a codificação dos indivíduos de uma população, considere uma função genérica de adaptação, como mostrada em (A.1). No processo de otimização de funções deste tipo, de múltiplos parâmetros, os 'cromossomos' podem ser codificados, como já mencionado, por seqüências de *bits*. Na função ilustrada, x_1, x_2, \dots, x_m são os parâmetros de entrada, 'cromossomos', e f_A é a função de adaptação.

$$f_A(x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (\text{A.1})$$

Supondo uma função de três parâmetros independentes (temperatura, pressão e umidade, para citar alguns), a seqüência de *bits* poderia ser composta por três 'genes' de 8, 6 e 4 *bits* respectivamente. Logo, um exemplo de 'cromossomo' para este problema poderia ser:

11010100 010110 1100

Uma vez escolhida a codificação para o problema, deve-se avaliar e selecionar os indivíduos mais aptos de acordo com a função de adaptação definida e formar a nova população utilizando os operadores apropriados de combinação e mutação sobre os indivíduos selecionados. A Figura A.2 ilustra a seleção dos cromossomos mais aptos da população (t) e os cruzamentos entre eles para a formação da nova população (t+1).

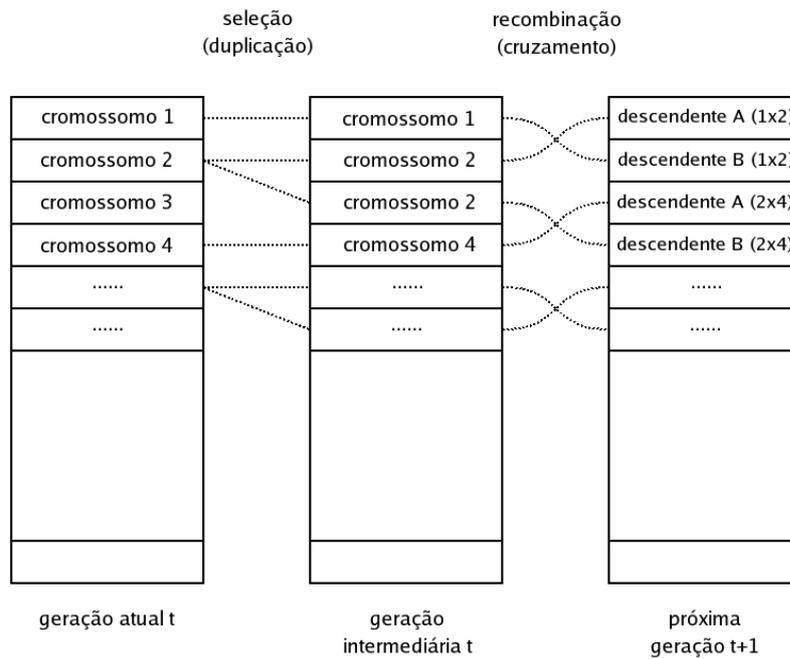


Figura A.2 – Seleção e recombinação dos indivíduos de uma população (WHITLEY, 2002)

A.4 SELEÇÃO DOS INDIVÍDUOS

A seleção dos indivíduos com maior aptidão, medida de acordo com a função de adaptação, pode ser realizada de várias maneiras. A seguir são apresentadas quatro formas de selecionar os indivíduos de uma população: o Método da Roleta, a Seleção por Ordenamento (ou *Rank*), o uso da Amostragem Estocástica Universal, e a seleção por Torneio.

Método da Roleta: Neste procedimento, a probabilidade de seleção de um certo cromossomo é diretamente proporcional à sua avaliação. Uma roleta virtual pode ser confeccionada onde cada fatia representa um indivíduo. O tamanho das fatias é proporcional a avaliação dos indivíduos pela função de adaptação. A roleta é girada (virtualmente) o número de vezes equivalente ao número de indivíduos que se deseja selecionar. No método da roleta, os indivíduos mais bem avaliados têm maior probabilidade de seleção. A expressão para o cálculo da aptidão relativa dos indivíduos de uma população é ilustrada pela expressão (A.2). Nesta expressão, p_i é a aptidão relativa do I_i indivíduo de uma população com N integrantes.

$$p_i = \frac{f_A(I_i)}{\sum_{i=1}^N f_A(I_i)} \quad (\text{A.2})$$

O problema deste procedimento é a dominância exercida por indivíduos de maior aptidão durante o procedimento de seleção. A dominância excessiva pode encaminhar para soluções locais do problema. Este problema pode ser reduzido com a mudança de escala da função de avaliação.

Seleção por Ordenamento (*Rank*): A seleção por ordenamento é semelhante ao método da roleta. Porém, neste procedimento, a probabilidade de seleção é calculada a partir do ordenamento dos indivíduos de acordo com sua aptidão (do pior para o melhor) e não diretamente pela aptidão relativa dos indivíduos. Duas alternativas para a atribuição da probabilidade de seleção aos indivíduos se destacam. A primeira alternativa é linear e a segunda exponencial. As duas expressões são apresentadas a seguir:

$$p_i = \alpha \cdot i + \beta \quad (\text{A.3})$$

$$p_i = \alpha \cdot \exp(\beta \cdot i + \gamma) \quad (\text{A.4})$$

Nas expressões (A.3) e (A.4), α , β e γ são coeficientes arbitrados e i é a posição, no ordenamento, de um indivíduo da população. O quadro da Figura A.3 ilustra comparativamente as proporções das fatias da roleta de seleção segundo a Seleção por Ordenamento e o Método da Roleta. Neste exemplo a população é composta de quatro indivíduos e a função objetivo que se deseja maximizar é x^2 , no intervalo $[0,30]$. Na Seleção por Ordenamento foi utilizada a expressão (A.3) com $\alpha=(1/10)$ e $\beta=0$.

Indivíduo (I_i)	Aptidão $f_A(I_i)$	Ordem	Aptidão Relativa	
			Método da Roleta	Seleção por Ordenamento
10	100	2	6,58%	20%
8	64	1	4,21%	10%
25	625	3	41,17%	30%
27	729	4	48,02%	40%

Figura A.3 – Seleção dos indivíduos de acordo com o Método da Roleta e Seleção por Ordenamento (GONÇALVES, 2004, p.77)

Amostragem Estocástica Universal: Este procedimento pode utilizar tanto as aptidões relativas calculadas pelo Método da Roleta como os calculados pelo Método de Seleção por Ordenamento. A seleção dos indivíduos é feita utilizando as aptidões relativas acumuladas, o número de indivíduos que se quer selecionar, n , e um número aleatório η entre 0 e $1/n$. São gerados, então, n apontadores, λ , calculados conforme expressão (A.5), que definirão quais são os intervalos das aptidões acumuladas dos indivíduos selecionados.

$$\lambda_i = \eta + (1/n) * (i - 1); i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{A.5})$$

O quadro da Figura A.4 ilustra este procedimento de seleção. No quadro foram utilizados os dados de aptidão relativa do Método da Roleta, disponíveis no quadro da Figura A.3. Busca-se neste exemplo selecionar os dois integrantes mais aptos da população composta de quatro indivíduos. Para $\eta = 0,1$; $\lambda_1 = 0,1$ e $\lambda_2 = 0,6$ e de acordo com os intervalos do quadro da Figura A.4, os indivíduos 8 e 27 seriam selecionados por este critério.

Indivíduo (I_i)	Intervalo de Seleção
10	[0,0:0,0658]
8	(0,0658:0,1079]
25	(0,1079:0,5196]
27	(0,5196:1,0]

Figura A.4 – Intervalos de seleção dos indivíduos para o uso com Amostragem Estocástica Universal

Seleção por Torneio: Nesta forma de seleção, escolhem-se aleatoriamente n indivíduos da população, com $2 < n < N$ (N = número de indivíduos da população). Entre os n indivíduos, seleciona-se o melhor avaliado de acordo com a função objetivo. O número n é conhecido como o ‘tamanho do torneio’ e é através dele que a pressão seletiva é controlada.

A.5 CRUZAMENTOS

A etapa posterior à seleção dos indivíduos mais aptos segundo uma função objetivo é o cruzamento entre eles para gerar uma nova geração de cromossomos. As formas usuais de combinação dos cromossomos são a combinação em um ou em múltiplos pontos de cruzamento. Para as alternativas de cruzamento entre dois indivíduos de uma população que é detalhada a seguir, considere os seguintes cromossomos (codificados em 2 bits):

110101000101101100 e xxyyyyxyxyxxxxxyx (cromossomos pais)

Um ponto de cruzamento: Define-se, segundo esta alternativa, um ponto de cruzamento nos dois cromossomos e os dois descendentes poderão ser formados a partir das partes dos ‘cromossomos’ dos pais. Por exemplo, utilizando os ‘cromossomos’ já mostrados, pode-se particioná-los uma vez, no mesmo ponto (aleatório) para ambos os pais, da seguinte maneira:

110101 + 000101101100 e xxyyyy + xyxyxyxxxxxyx

O cruzamento destes dois cromossomos resultará nos seguintes possíveis descendentes:

110101xyxyxyxxxxxyx e xxyyyy000101101100

Múltiplos pontos de cruzamento: Utiliza-se a mesma idéia do cruzamento em apenas um ponto, porém escolhem-se, agora, um número arbitrário de pontos de cruzamento. Para dois pontos de cruzamento entre os cromossomos utilizados no exemplo anterior, tem-se:

$$11010100 + 010110 + 1100 \text{ e } xxyyyyyxy + xyxyxx + xxyx$$

Os possíveis descendentes deste cruzamento serão:

$$11010100xyxyxx1100 \text{ e } xxyyyyyxy010110xxyx$$

A.6 MUTAÇÕES

A mutação aleatória de indivíduos de uma população é outra característica de sistemas evolutivos. Nos algoritmos genéticos que os cromossomos da população estão codificados na forma binária, a maneira mais simples de simular a mutação é inverter o *bit* de uma posição aleatória do cromossomo, como mostrado a seguir:

110101000101101100 (cromossomo original)

110101001101101100 (cromossomo alterado, o nono bit passou de 0 para 1)

Pode-se sofisticar o processo de mutação dos cromossomos por exemplo, seguindo as seguintes formas de mutação aplicadas aos genes:

Uniforme: O gene do cromossomo é substituído por outro (alelo).

Deslocamento: Nesta mutação os genes do cromossomo são substituídos por alelos próximas.

Exponencial: Esta mutação define a proximidade estatística das alelos dos genes mutantes exponencialmente (maior probabilidade para alelos próximas, menor probabilidade para alelos distantes do gene original).

A.7 O MODELO NK

O modelo NK busca descrever as propriedades gerais de sistemas de elementos interconectados. Na sua forma básica, o modelo descreve um sistema de N elementos podendo assumir um certo número de estados, ou alelos. No caso do desenvolvimento de produtos, se o número de estados de cada elemento for chamado de Z_n , o espaço de desenvolvimento do produto N -dimensional consiste de um número discreto de alternativas de projeto, dados pela expressão (A.6) (BRABAZON e MATTHEWS, 2003).

$$\prod_{n=1}^N Z_n \quad (\text{A.6})$$

Com o crescimento linear de N , o número de alternativas de desenvolvimento cresce exponencialmente. Este problema pode ser representado como um problema combinatório, com o projetista buscando a melhor, ou pelo menos mais satisfatória, combinação de elementos para atingir os objetivos do projeto. A complexidade desta tarefa é impactada tanto pelo tamanho N como pelo grau de conectividade dos elementos do sistema. O modelo NK considera o comportamento de sistemas com N elementos, cada um deles interconectado a outros K elementos ($K < N$). O valor, ou adequação do sistema depende tanto do estado de cada um dos elementos como do estado dos elementos aos quais estão conectados (BRABAZON e MATTHEWS, 2003).

Brabazon e Matthews (2003) ilustram o modelo NK com dois exemplos. Ambos com três elementos ($N=3$) e cada um deles podendo variar em dois níveis: 0 e 1 (alelos). Portanto $2^3=8$ configurações de ‘produto’ podem ser obtidos a partir destes elementos. Neste exemplo os autores demonstram que o valor de adequação de cada configuração depende do valor K . No primeiro exemplo, $K=0$ e os alelos dos elementos contribuem sempre com o mesmo valor de adequação para a alternativa. No segundo exemplo, $K=2$ e, neste caso, os alelos de cada um dos elementos contribuem com valores diferentes de adequação para a configuração, pois são influenciados pelos alelos dos demais elementos da configuração. O quadro da Figura A.5 mostra os valores de adequação para estes dois casos. As Figuras A.6 e A.7 ilustram graficamente os valores de adequação das alternativas de configuração. Por se tratar de uma

codificação de oito alternativas de ‘produtos’, utiliza-se um cubo cujos vértices representam cada uma das alternativas possíveis.

Alternativas	N=3, K=0				N=3, K=2			
	f1	f2	f3	F	f1	f2	f3	F
000	,4	,7	,1	,40	,3	,6	,8	,57
001	,4	,7	,3	,47	,5	,3	,5	,46
010	,4	,6	,1	,37	,2	,7	,4	,43
011	,4	,6	,3	,43	,8	,6	,9	,77
100	,9	,7	,1	,57	,9	,6	,1	,53
101	,9	,7	,3	,63	,5	,3	,7	,50
110	,9	,6	,1	,53	,3	,1	,3	,23
111	,9	,6	,3	,60	,7	,9	,2	,60

Figura A.5 – Valores de adequação para os elementos e para o ‘produto’ para K=0 e 2 (BRABAZON e MATTHEWS, 2003)

No quadro da Figura A.5, f_i , com $i=1,2$ e 3 , são os valores de adequação do elemento i da configuração; F é o valor de adequação da configuração obtido pela média dos valores de adequação dos elementos.

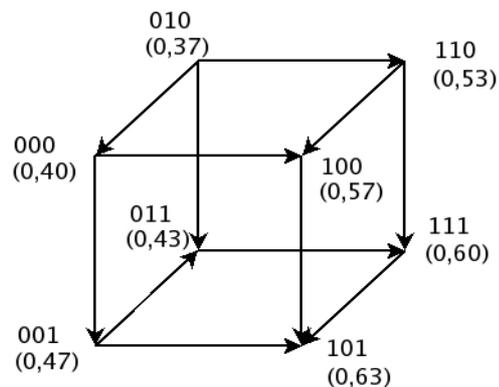


Figura A.6 – Interpretação gráfica da adequação ($N=3$, $K=0$) (BRABAZON e MATTHEWS, 2003)

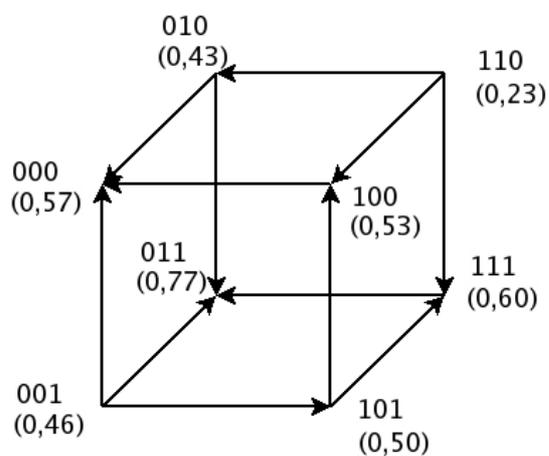


Figura A.7 – Interpretação gráfica da adequação ($N=3$, $K=2$) (BRABAZON e MATTHEWS, 2003)

O ponto chave do modelo NK é a percepção das alterações bruscas de adequação entre configurações próximas de ‘produtos’ que são decorrentes do aumento do valor K . A medida que estas variações aumentam, mais difícil se torna a busca. Intuitivamente, o número de ‘ótimos’ locais cresce com os valores de K .

APÊNDICE B – Medição das Preferências

Neste apêndice apresenta-se a abordagem proposta para medir as preferências dos consumidores. Esta abordagem é utilizada no exemplo de aplicação do método de definição da arquitetura e das configurações dos produtos do Capítulo 6. A abordagem é híbrida e baseada na Análise Conjunta Adaptativa. Na primeira seção deste apêndice, os passos sugeridos para operacionalizar a medição das preferências são apresentados. Em seguida os atributos dos produtos, seus níveis, e as configurações para comparação são escolhidas. A construção do formulário de medição das preferências dos consumidores utilizado no exemplo de aplicação é mostrada na seção seguinte. O levantamento e tratamento das informações de preferências e os resultados da medição provenientes da medição auxiliada pelo formulário desenvolvido são os assuntos das últimas seções deste apêndice.

B.1 ABORDAGEM DE MEDIÇÃO

A abordagem proposta para a medição das preferências dos consumidores utiliza uma base de dados composicional combinada com um conjunto de avaliações de configurações de produtos aos pares. Para evitar que os resultados das medições decomposicionais sejam dominantes e o ordenamento de um número significativo de configurações de produtos, descartou-se a tradicional abordagem da Análise Conjunta Híbrida. Por não ser prático (depende do uso de computadores durante a pesquisa), o procedimento de medição da Análise Conjunta Adaptativa também foi descartado. A abordagem de medição derivada neste trabalho é composta de 5 passos, muitos deles comuns às abordagens híbridas. O primeiro passo é a definição dos atributos e seus níveis que devem descrever tanto as configurações dos produtos concorrentes como as configurações de produtos próprios. Em seguida, devem ser escolhidas as configurações para comparação de perfis completos de produtos. Uma vez conhecidos os atributos, seus níveis e os perfis para as comparações dos produtos aos pares, pode-se construir o formulário de medição. Os passos seguintes são a medição das preferências junto aos potenciais consumidores e o tratamento dos dados.

B.2 ATRIBUTOS, NÍVEIS E CONFIGURAÇÕES PARA COMPARAÇÃO

A definição dos atributos e seus níveis para a configuração dos produtos é uma tarefa que demanda conhecimento do mercado ao qual o produto se destina e das configurações dos produtos competidores. Para o caso específico dos mini-fornos elétricos, a título de ilustração, admite-se que 11 atributos são importantes e suficientes para diferenciar as diversas configurações possíveis destes produtos. Os atributos são: marca (7 níveis), preço (6 níveis), capacidade (3 níveis), controle de aquecimento (2 níveis), temporizador c/aviso sonoro (2 níveis), potência (3 níveis), *display* e controle digital (2 níveis), cor (4 níveis), *layout* (2 níveis) e eixo de abertura da porta (2 níveis). Neste exemplo, o número mínimo de níveis entre os atributos é 2 e o número máximo é 7 (caso do atributo marca). Os atributos e níveis propostos para descrição dos produtos podem ser vistos no formulário de medição, Figura B.3.

Escolhidos os atributos e seus níveis, o passo seguinte é definir o número de comparações entre perfis completos de produtos e quais configurações serão utilizadas na comparação. O número de configurações para comparação deve ser definido para não onerar em demasia o tempo dos entrevistados. Na Análise Conjunta Híbrida (parcela decompositiva) propõe-se que não sejam utilizadas mais que 8 ou 9 configurações para ordenamento. Utilizando esta proposta como referência, optou-se por utilizar 7 comparativos entre configurações neste exemplo de aplicação – portanto 14 configurações distintas devem ser escolhidas (o dobro do número de níveis do atributo com mais níveis). As 14 configurações de produtos para comparação foram escolhidas de maneira que formassem um conjunto ortogonalizado (menor somatório do produto interno entre os vetores representativos das configurações) e são apresentadas no quadro da Figura B.1. Neste quadro, cada linha é uma configuração de produto e cada coluna representa um atributo. Ou seja, o número x presente na coluna y da linha z do quadro da Figura B.1 representa a presença do nível x do atributo y na configuração de produto z .

Configuração	Níveis dos Atributos									
	1	6	3	1	2	2	2	2	2	2
A	1	6	3	1	2	2	2	2	2	2
B	2	3	2	2	1	1	1	2	1	2
C	4	4	1	2	2	3	2	3	2	1
D	5	2	1	2	1	2	2	1	1	1
E	7	5	2	1	2	1	1	4	1	2
F	7	2	3	1	1	3	1	2	2	2
G	6	5	3	2	1	2	2	4	1	2
H	2	5	2	1	1	1	2	1	2	2
I	3	4	3	2	1	3	1	3	2	1
J	1	1	3	2	1	1	1	3	1	2
K	4	1	2	1	2	3	2	1	2	1
L	3	6	1	1	2	2	1	4	2	1
M	6	3	1	2	2	1	1	1	1	1
N	5	6	1	1	2	3	2	2	1	1

Figura B.1 – Configurações ortogonalizadas para comparação

As 14 configurações apresentadas no quadro da Figura B.1 são apresentadas, durante a medição das preferências, aos pares para comparação de suas utilidades pelos potenciais consumidores. Os pares de configurações são escolhidos para que sejam minimizados os níveis dos atributos comuns. Seguindo esta premissa pode-se, por inspeção, obter os 7 pares de configurações para comparação do quadro da Figura B.2.

Pares de Configurações para Comparação
M x F
G x K
I x E
B x L
C x H
J x N
A x D

Figura B.2 – Pares de configurações dos produtos para comparação

B.3 FORMULÁRIO DE PESQUISA

Definidos os atributos, seus níveis, os perfis completos e os pares para comparação, deve-se construir o formulário de pesquisa. O formulário para o levantamento das preferências dos consumidores, seguindo a abordagem proposta, tem duas partes. A primeira parte é utilizada para a medição das preferências segundo abordagem composicional. A segunda parte para a medição das preferências segundo abordagem decomposicional. Para a parcela composicional, tem-se um quadro no qual são descritos os atributos e seus níveis, Figura B.3. Na segunda parte, parcela decomposicional, são apresentadas as 7 comparações sugeridas entre perfis completos de produtos utilizados para 'calibrar' as utilidades computadas pela abordagem composicional. Os perfis completos para comparação são apresentados aos consumidores de forma gráfica e textual, como pode ser visto nas Figuras B.4 e B.5.

Pesquisa n° _____

Níveis/Atributos	marca	preço [Reais]	capacidade [Litros]	controle aquecimento	temporizador c/aviso sonoro	potência [Watts]	display e controle digital	cor	lay-out	abertura da porta [Eixo]
1	Arno	100,00	7	presente	presente	650	presente	branco	horizontal	horizontal
2	B&D	125,00	8	ausente	ausente	850	ausente	preto	vertical	vertical
3	Britânia	150,00	9	---	---	1050	---	prata	---	---
4	Cadence	175,00	---	---	---	---	---	vermelho	---	---
5	Hot	200,00	---	---	---	---	---	---	---	---
6	Suggar	225,00	---	---	---	---	---	---	---	---
7	Walita	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Pesos dos Atributos	marca	preço [Reais]	capacidade [Litros]	controle aquecimento	temporizador c/aviso sonoro	potência [Watts]	display e controle digital	cor	lay-out	abertura da porta [Eixo]
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										

Figura B.3 – Formulário para avaliação compositiva das utilidades parciais

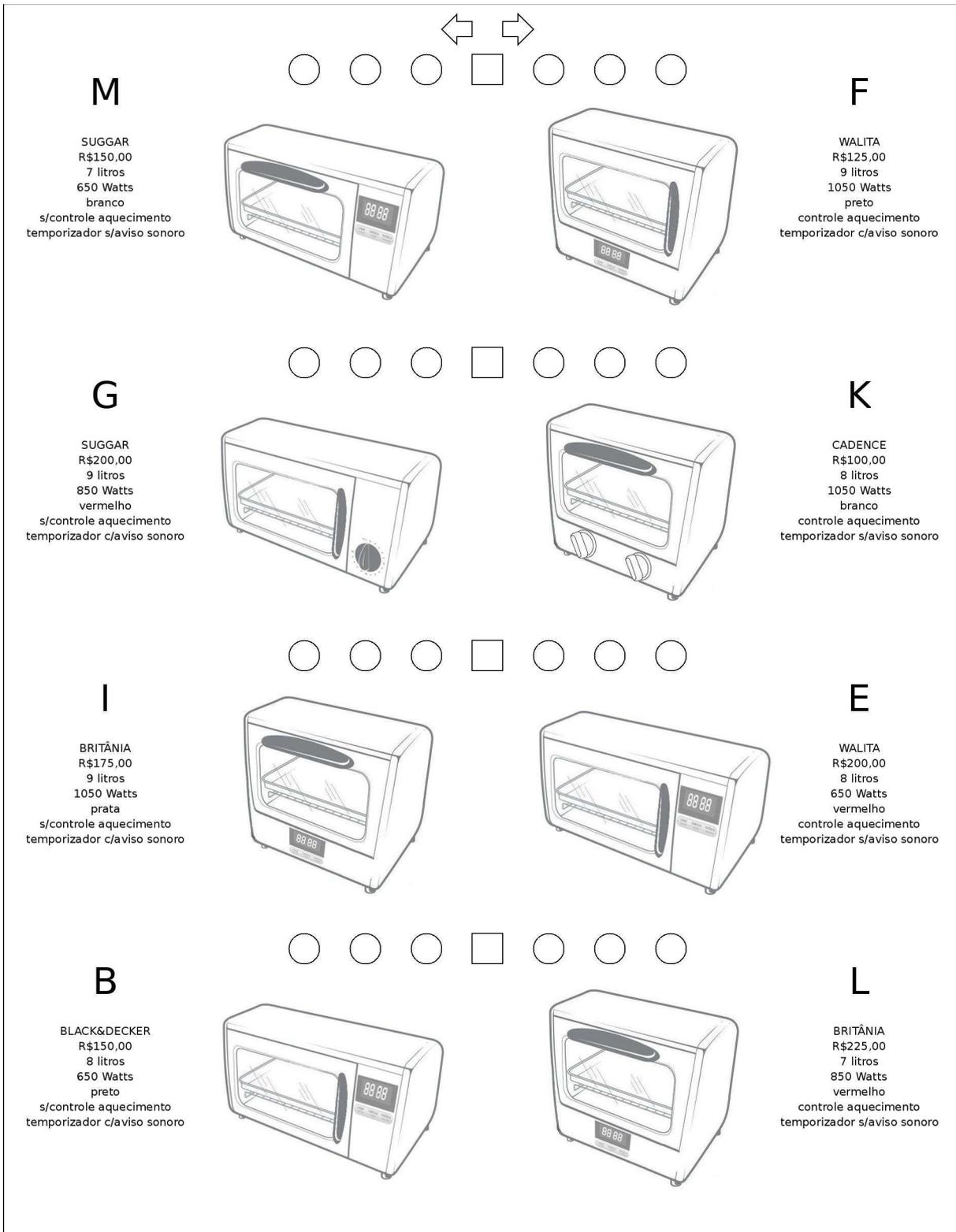


Figura B.4 – Primeira parte do formulário para avaliação decompositiva^{B.1}

B.1 Formas derivadas do modelo de mini-forno elétrico Britânia

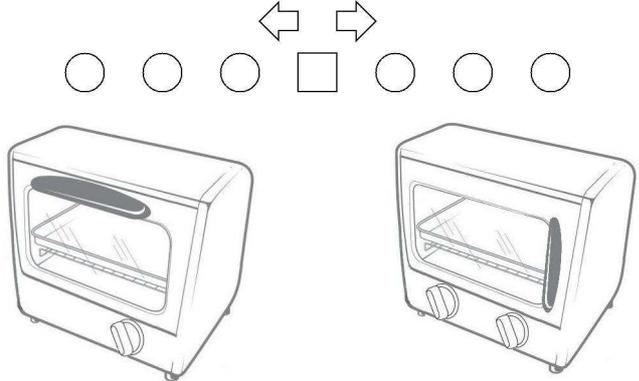
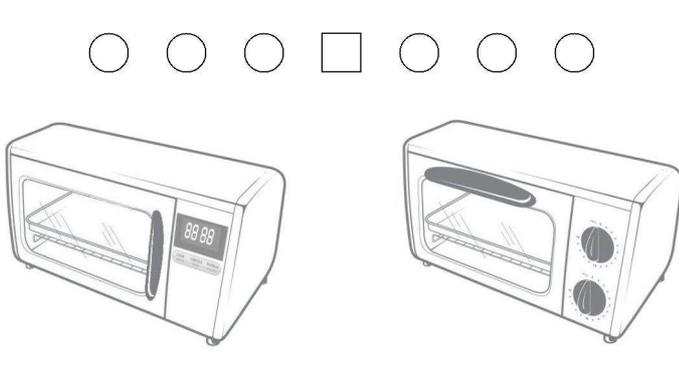
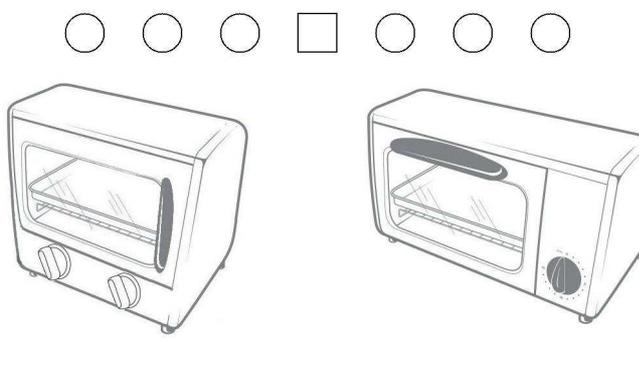
<p>C</p> <p>CADENCE R\$175,00 7 litros 1050 Watts prata s/controla aquecimento temporizador s/aviso sonoro</p>		<p>H</p> <p>BLACK&DECKER R\$200,00 8 litros 650 Watts branco controla aquecimento temporizador c/aviso sonoro</p>
<p>J</p> <p>ARNO R\$100,00 9 litros 650 Watts prata s/controla aquecimento temporizador c/aviso sonoro</p>		<p>N</p> <p>HOT R\$225,00 7 litros 1050 Watts preto controla aquecimento temporizador s/aviso sonoro</p>
<p>A</p> <p>ARNO R\$225,00 9 litros 850 Watts preto controla aquecimento temporizador s/aviso sonoro</p>		<p>D</p> <p>HOT R\$125,00 7 litros 850 Watts branco s/controla aquecimento temporizador c/aviso sonoro</p>

Figura B.5 – Segunda parte do formulário para avaliação decompositiva

B.4 LEVANTAMENTO DAS INFORMAÇÕES

A abordagem híbrida adotada neste exemplo de aplicação é iniciada com o levantamento das preferências dos consumidores de forma composicional, ou seja, levantamento direto das utilidades das partes. O procedimento adotado para este levantamento apresenta ao potencial consumidor os atributos dos produtos e seus níveis. Inicialmente, utilizando uma escala que varia de 1 até 10, pede-se que o consumidor potencial avalie cada um dos atributos dos

produtos. O atributo de maior importância para este consumidor deve receber peso 10 e o atributo de menor importância deve receber peso 1. Os demais atributos devem receber pesos entre estes limites. Dois, ou mais, atributos podem receber o mesmo peso. O quadro da Figura B.6 ilustra em sua primeira linha a atribuição dos pesos dos atributos, seguindo o procedimento descrito, de um potencial consumidor pesquisado. Procedimento idêntico é seguido para o levantamento das preferências entre os níveis de cada um dos atributos. O nível que o potencial consumidor considera mais importante deve receber peso 10, o nível considerado menos importante deve receber peso 1, e os demais níveis devem receber pesos entre estes limites (novamente 2, ou mais, níveis podem ter os mesmos pesos). O quadro da Figura B.6 mostra os pesos assinalados por um consumidor potencial pesquisado para os níveis dos atributos considerados neste exemplo.

Para ajustar as utilidades parciais dos consumidores obtidos com a abordagem composicional, são utilizadas as configurações completas dos produtos que são apresentadas aos consumidores para avaliação. Neste levantamento de preferências optou-se, como visto nas seções anteriores, pela avaliação comparativa das configurações aos pares. Entre 2 configurações de produtos, o consumidor potencial pode optar pela indiferença ou por uma das configurações. Ao optar por uma das configurações o consumidor deve indicar, numa escala de 3 níveis, quão atrativo é o produto em relação ao produto que foi preterido. O nível 1 indica que um produto é levemente mais atrativo que seu concorrente, o nível 2 corresponde a certeza do consumidor que o produto é melhor que seu concorrente, e o nível 3 indica que um dos produtos é muito superior ao seu concorrente. A indiferença entre as configurações é associada ao nível 0.

Pesos	7	10	2	4	4	6	4	3	3	1
Atributos / Níveis	marca	preço [Reais]	capacidade [Litros]	controle aquecimento	temporizador c/aviso sonoro	potência [Watts]	display	cor	layout	abertura da porta [Eixo]
1	8	10	1	10	10	1	10	1	1	1
2	10	8	10	1	1	6	1	10	10	10
3	5	6	7	---	---	10	---	8	---	---
4	5	4	---	---	---	---	---	5	---	---
5	1	2	---	---	---	---	---	---	---	---
6	1	1	---	---	---	---	---	---	---	---
7	10	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Figura B.6 – Pesos dos atributos e seus níveis segundo um consumidor potencial

B.5 TRATAMENTO DAS INFORMAÇÕES

O primeiro passo no tratamento das informações obtidas junto aos consumidores é a multiplicação dos pesos dos atributos pelos pesos de seus níveis, que resulta numa medida relativa das utilidades parciais para um determinado consumidor. O passo seguinte desta parcela composicional da abordagem híbrida é a normalização das utilidades parciais. Propõe-se que a normalização seja tal que a configuração do produto de maior utilidade para um determinado consumidor seja igual a 4. Esta proposta deve-se à adoção de uma escala para comparação de configurações de fundo 2,25, que será apresentada adiante. A normalização proposta pode ser calculada pelas expressões (B.1) e (B.2). Na expressão (B.1) U_{max} é a utilidade total máxima entre as configurações possíveis dos produtos, NA é o número total de atributos empregados na medição e P_{Ai} é o peso dado ao atributo i pelo consumidor. Na expressão (B.2) u_{ij} é a utilidade parcial, composicional, normalizada do nível i do atributo j , e P_{NiAj} é o peso do nível i do atributo j (pesos ilustrados no quadro da Figura B.6).

$$U_{max} = 10 \sum_{i=1}^{NA} P_{Ai} \quad (B.1)$$

$$u_{ij} = \frac{4 \cdot P_{Ai} \cdot P_{NiAj}}{U_{max}} \quad (\text{B.2})$$

Com os dados de preferência de um consumidor potencial mostrados no quadro da Figura B.6 e o procedimento descrito neste parágrafo, expressões (B.1) e (B.2), as utilidades parciais são recalculadas. Estas utilidades parciais são apresentadas no quadro da Figura B.7.

NÍVEIS	ATRIBUTOS									
	marca	preço [Reais]	capacidade [Litros]	controle aquecimento	temporizador c/aviso sonoro	potência [Watts]	display	cor	layout	abertura da porta [Eixo]
1	0,5091	0,9091	0,0182	0,3636	0,3636	0,0545	0,3636	0,0273	0,0273	0,0091
2	0,6364	0,7273	0,1818	0,0364	0,0364	0,3273	0,0364	0,2727	0,2727	0,0909
3	0,3182	0,5455	0,1273	---	---	0,5455	---	0,2182	---	---
4	0,3182	0,3636	---	---	---	---	---	0,1364	---	---
5	0,0636	0,1818	---	---	---	---	---	---	---	---
6	0,0636	0,0909	---	---	---	---	---	---	---	---
7	0,6364	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Figura B.7 – Utilidades parciais de um consumidor potencial

Com os pares de configurações apresentados aos potenciais consumidores para que suas preferências sejam verificadas, os entrevistados podem escolher entre a indiferença, assinalando o quadrado entre as ilustrações, e os três possíveis níveis de satisfação relativa para cada uma das comparações. Para manter a porção decomposicional da medição coerente com a porção composicional, a diferença entre as utilidades dos produtos comparados obedece a seguinte relação: se o nível 1 é dado para o produto escolhido na comparação, assume-se que este produto tenha uma utilidade 0,75 maior que o produto preterido; o nível 2 equivale a diferença de 1,25 entre as utilidades dos produtos; por fim, o nível 3 equivale a diferença de 2,25 entre as utilidades das configurações propostas para escolha.

A escala sugerida no parágrafo anterior é adotada porque a maior utilidade possível de uma configuração para um potencial consumidor é 4 e a menor é 0,4 (combinações das utilidades parciais do quadro da Figura B.7). Como é improvável que entre as comparações entre os

perfis completos estejam justamente estas configurações, a diferença entre as utilidades dos pares deverá ser sempre menor que 3,6. Admitindo que as diferenças entre as utilidades das configurações para os potenciais consumidores dos pares apresentados não estão próximas deste extremo, assume-se que a maior diferença seja de 2,25. Para justificar esta escolha, considere a Figura B.8 que ilustra a estimativa da distribuição de probabilidades das diferenças entre as configurações dos produtos. Nesta figura, 1.000.000 de comparações entre configurações foram calculadas. As comparações são calculadas entre utilidades de configurações para um mesmo entrevistado. As configurações e o indivíduo cujas preferências foram empregadas foram definidos aleatoriamente.

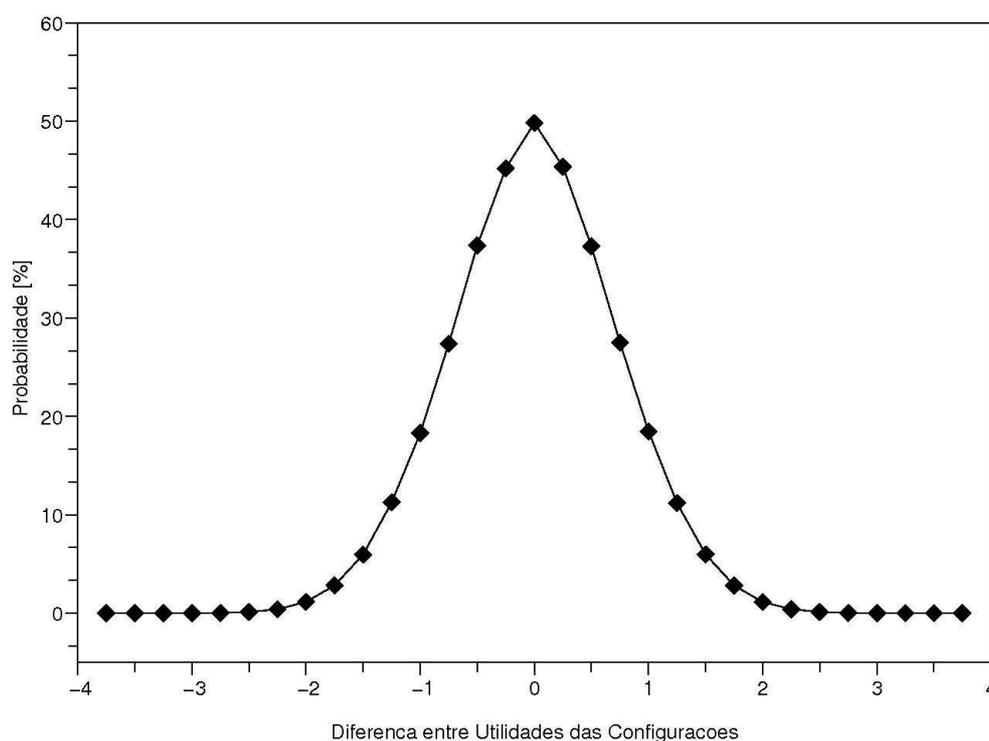


Figura B.8 – Estimativa da distribuição da probabilidade das diferenças entre utilidades

Na Figura B.8 pode-se ver que a distribuição da probabilidade de ocorrência das diferenças entre as utilidades das configurações tem a forma tradicional de sino da distribuição normal. A partir dos dados que definem a curva da Figura B.8, pode-se calcular uma estimativa para a

média e para o desvio padrão das diferenças entre as utilidades das configurações dos produtos (McCLAVE e SINCICH, 2000). A estimativa da média (média da amostra) é 0,002 [unidades de diferença] e a estimativa do desvio padrão (desvio padrão da amostra) é 0,776 [unidades de diferença]. Ou seja, como a distribuição é normal, aproximadamente 99,7% das diferenças entre as utilidades das configurações dos produtos estão entre $0,002-3(.776)=-2.33$ e $0,002+3(.776)=2,33$. Portanto a escala adotada para a comparação entre os perfis completos dos produtos, entre -2,25 e 2,25, praticamente cobre todas as possíveis comparações. Uma alternativa é adotar uma escala que varia entre -1,5 e 1,5 (0,5 para cada incremento de escala) admitindo uma cobertura de 95% das possíveis diferenças entre utilidades das configurações, neste caso ganha-se uma resolução maior para diferenciar as alternativas de configurações.

Depois de calculadas as utilidades parciais seguindo a abordagem compositiva, ilustrada no quadro da Figura B.7, podem ser calculadas as utilidades de qualquer configuração de produto descrito pelos atributos pesquisados. Para ajustar as utilidades parciais obtidas com a abordagem compositiva, estas medições são combinadas com as comparações entre os perfis completos de produtos (abordagem decompositiva). Este ajuste pode ser realizado agrupando em uma matriz as descrições das 14 configurações de produtos listadas no quadro da Figura B.1 e as comparações propostas entre estas mesmas configurações, quadro da Figura B.2. Forma-se esta matriz utilizando o conceito de variáveis *dummy*, ou seja, para cada atributo do produto de uma configuração particular apenas um dos níveis estará ativo (representado com a unidade) e os demais níveis estarão inativos (representados por zeros). As primeiras 14 linhas desta matriz são definidas pelas 14 configurações no quadro da Figura B.1, as 7 linhas seguintes são definidas pelas comparações listadas no quadro da Figura B.2 (empregando a escala definida no parágrafo anterior). Um sistema linear pode ser formado pela matriz descrita neste parágrafo, pelas incógnitas (vetor das utilidades parciais que se deseja corrigir), e pelo vetor composto das utilidades totais das configurações e das diferenças de utilidades entre as configurações comparadas. O sistema linear construído para as respostas do indivíduo que está sendo utilizado como exemplo deste procedimento de medição das preferências é apresentado na Figura B.9. As utilidades parciais corrigidas podem ser obtidas aplicando, por exemplo, o método dos mínimos quadrados ao sistema linear da Figura B.9.

quadro da Figura B.10. Nesta tabela são mostradas as importâncias de cada atributo medidas pelo método direto e híbrido, corrigidas pelas comparações entre perfis completos de produtos via sistema linear apresentado no Apêndice A, para o indivíduo utilizado neste exemplo.

Atributos	Importâncias [%]	
	Direta	Híbrida
Marca	15.91	16.51
Preço	22.73	21.25
Capacidade	4.54	11.97
Controle	9.09	0.23
Temporizador	9.09	16.57
Potência	13.64	6.28
<i>Display</i>	9.09	13.61
Cor	6.82	6.40
<i>Layout</i>	6.82	7.06
Abertura da Porta	2.27	0.12

Figura B.10 – Comparativo das importâncias dos atributos, com e sem correção

Algumas utilidades medidas de forma direta são mantidas quando o potencial consumidor é submetido a comparação entre perfis completos de produtos, porém algumas são alteradas significativamente. Considere, por exemplo, o atributo Abertura da Porta. Este atributo, inicialmente, para este consumidor particular, apresentava uma importância relativa de 2,27%. Ao ajustar esta importância com as informações obtidas de forma decompositiva a importância caiu para 0,12%. Para este consumidor, ao avaliar racionalmente as alternativas, a abertura da porta girando em torno de um eixo vertical era mais útil que a abertura da porta em torno de um eixo horizontal. Ao comparar os perfis completos de produtos apresentados, este consumidor considerou mais úteis as alternativas com abertura da porta em torno de um eixo horizontal. Ao ajustar os dados obtidos de forma direta com as informações decompositivas, por compensação, a importância deste atributo caiu praticamente a zero (apesar de já ser baixo quando medido diretamente). Como a importância dos atributos é

comparativa, ao cair a importância deste atributo específico, após o ajuste, os demais atributos são corrigidos. Esta análise é válida para todos os atributos que foram considerados na descrição dos produtos.

B.7 RESULTADOS DA PESQUISA DAS PREFERÊNCIAS

O procedimento para a medição das preferências dos consumidores apresentado neste apêndice foi aplicado a 42 potenciais consumidores de mini-fornos elétricos. Após o preenchimento dos formulários apresentados na Seção B.3 deste apêndice, os dados foram tratados segundo o procedimento descrito na Seção B.5. As utilidades parciais para os níveis dos atributos apresentados para avaliação estão compilados na Figura B.11. Estas utilidades parciais são utilizadas como informação de entrada no processo de definição das configurações dos integrantes de uma família de 3 mini-fornos elétricos do exemplo de aplicação proposto no Capítulo 6 do método desenvolvido nesta tese.

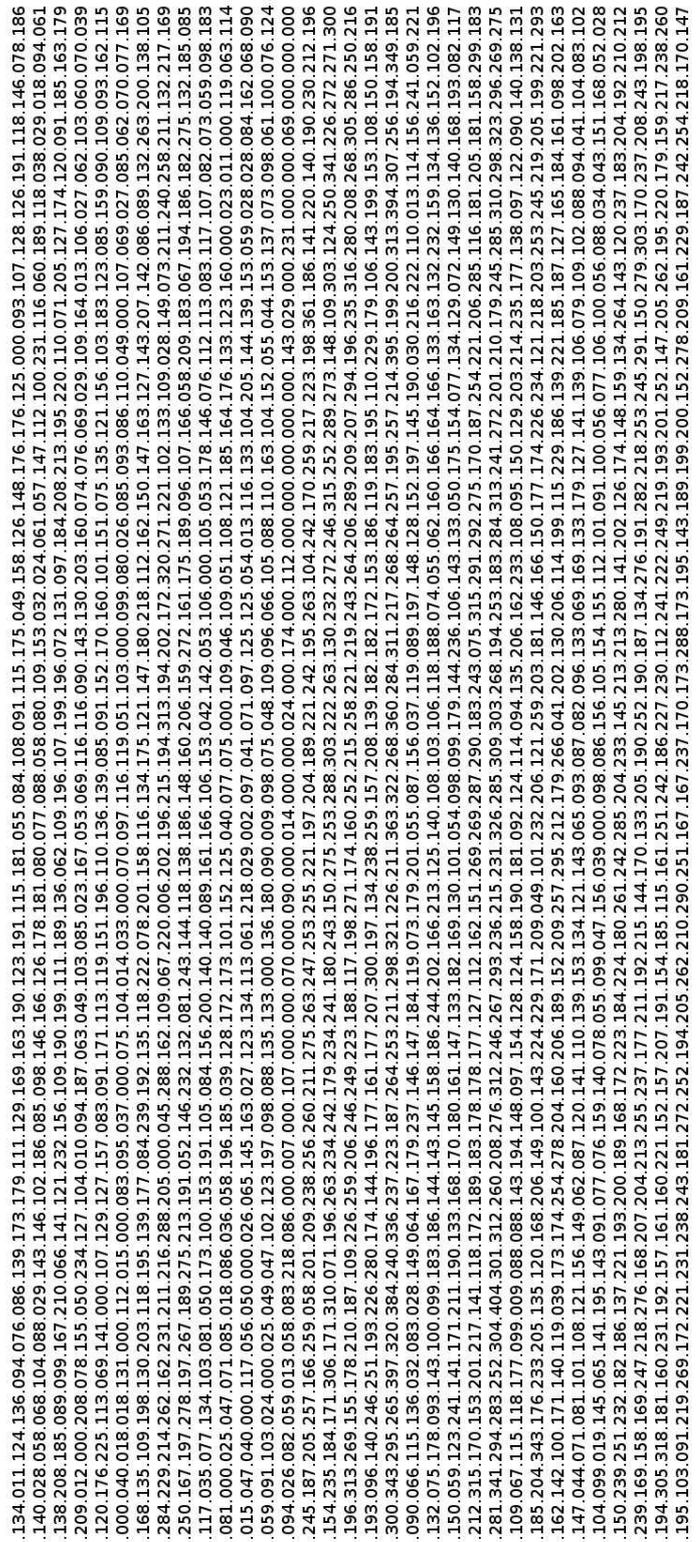


Figura B.11 – Utilidades Parciais dos 42 entrevistados

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)