

A FEA e a USP respeitam os direitos autorais deste trabalho. Nós acreditamos que a melhor proteção contra o uso ilegítimo deste texto é a publicação online. Além de preservar o conteúdo motiva-nos oferecer à sociedade o conhecimento produzido no âmbito da universidade pública e dar publicidade ao esforço do pesquisador. Entretanto, caso não seja do interesse do autor manter o documento online, pedimos compreensão em relação à iniciativa e o contato pelo e-mail [bibfea@usp.br](mailto:bibfea@usp.br) para que possamos tomar as providências cabíveis (remoção da tese ou dissertação da BDTD).

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
FACULDADE DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E CONTABILIDADE  
DEPARTAMENTO DE ADMINISTRAÇÃO**

**ESTRATÉGIA DE TESTES NO  
DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS:  
UM ESTUDO DAS DEPENDÊNCIAS PROBABILÍSTICAS**

**PROF. DR. ABRAHAM SIN OIH YU**

**SÃO PAULO**

**2003**

T658.575  
y94e

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**FACULDADE DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E CONTABILIDADE**  
**DEPARTAMENTO DE ADMINISTRAÇÃO**

DEDALUS - Acervo - FEA



20600026107

**ESTRATÉGIA DE TESTES NO  
DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS:  
UM ESTUDO DAS DEPENDÊNCIAS PROBABILÍSTICAS**

<b>USP - FEA - SBD</b>
DATA DA DEFESA <u>18 / 02 / 04</u>

**PROF. DR. ABRAHAM SIN OIH YU**

**Tese apresentada ao Departamento de Administração da  
Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade  
da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos  
necessários à obtenção do título de Livre-Docente.**

85972

**SÃO PAULO**

**2003**

85972

*Aos meus pais,  
Dedico este trabalho*

## **Agradecimentos**

Agradeço aos colegas da FEA/USP que me incentivaram ao longo deste percurso. À parceria com o Professor Paulo Tromboni de Nascimento, para criar e nutrir uma linha de pesquisa em desenvolvimento de produtos na FEA/USP, que foi fundamental para a realização do presente trabalho. Aos alunos do Seminário de Pesquisa em Administração da Inovação em Produtos e Processos que contribuíram com comentários e sugestões às minhas apresentações, em vários estágios da elaboração desta pesquisa.

Agradeço aos colegas da Divisão de Economia e Engenharia de Sistemas do IPT pelo apoio e incentivo, em particular, a Cidinha Sanches Fonseca, Edna Gubitoso e Fábio L. Mariotto.

À minha esposa Mi-Si e à minha filha Joanna, por tudo que convivemos juntos.

## Resumo

Esta pesquisa analisa as possíveis dependências probabilísticas entre as alternativas de *design* e os testes em desenvolvimento de produtos, e seus impactos na determinação de estratégia de testes. As pesquisas existentes sobre estratégia de teste geralmente assumem a independência probabilística entre essas variáveis e o objetivo desta pesquisa é contribuir para a literatura explorando essas dependências. A análise é realizada através de modelos matemáticos de problemas de testes com até três tipos de testes e até duas alternativas de *design*. A estrutura metodológica dos modelos é baseada na análise de decisão. Esses modelos permitem que as dependências sejam identificadas e definidas, e suas relações com outros parâmetros chaves do problema de testes são desenvolvidas em detalhes. A dependência entre as probabilidades de sucesso dos *designs* é denominada de influência entre *designs*. As dependências entre os testes são denominadas de confiabilidades condicionadas.

Os resultados mostram que a influência entre os *designs* é determinante na definição de estratégia ótima de testes através de suas relações com as probabilidades condicionais. Adicionalmente, os resultados mostram que é necessário especificar pelo menos duas confiabilidades condicionadas para caracterizar completamente as relações entre uma alternativa de *design* e dois testes imperfeitos. A incorporação de mais de um tipo de teste, nos modelos, permite a análise de estratégias de testes com diferentes tecnologias de experimentação. Os resultados indicam que a estratégia de utilizar teste perfeito, ou lançamento direto no mercado, é ótima em várias situações de testes. Finalmente, os resultados desta pesquisa são utilizados para analisar conceitualmente algumas pesquisas empíricas sobre estratégia de testes. Os resultados mostram a potencialidade de interação entre as pesquisas analíticas e empíricas. As principais sugestões para pesquisas futuras são: pesquisar a ocorrência simultânea de confiabilidade condicionada e influência entre *designs*; desenvolver modelos mais genéricos envolvendo  $n$  *designs* e  $m$  tipos de testes; incorporar a geração de alternativas de *design* durante o projeto de desenvolvimento; e integrar num modelo de estratégia de teste a seleção de *designs* e a identificação e correção de problemas.

## Abstract

This study analyzes the possible probabilistic dependences among alternative designs and tests in product development projects. This is a research area that has not received much attention, given most existing studies have assumed probabilistic independence among these variables. The main goal of this study is twofold: 1) to establish the basic conceptual structures for research in this area, and 2) to analyze the impact of dependence on the optimal test strategy. We approach this goal by developing several mathematical models of testing in product development based on decision analysis. These models have up to two design alternatives and up to three types of tests, and by analyzing these models we are able to identify and define rigorously the dependences among designs and among tests. The dependence among designs is defined as the influence among designs and the dependences among tests are called condicional reliabilities.

The key results of this study are: 1) We determine that the influence among designs affects significantly the optimal strategy through its relationship with key conditional probabilities in the test; 2) We demonstrate that, in order to characterize completely the relationship between one design and two tests, we need to specify, at most, two conditional reliabilities; 3) We analyze the optimal strategy when there are more than one type of tests, and the results indicate that the use of comprehensive prototype can be the best strategy in many circumstances; and 4) We employ our models to analyze qualitatively three empirical studies on test strategy and the results show the potential complementarities between analytical and empirical researches. Several topics for future researches in this area are suggested: the first is to generalize the model to  $n$  designs and  $m$  types of tests; the second is to consider the influences among designs and the conditional reliabilities simultaneously; and the third is to incorporate, as decision variables, both design selection and problem detection.



<b>Capítulo 4 – PROBLEMA DE TESTE COM DUAS ALTERNATIVAS DE <i>DESIGNS</i></b>	<b>88</b>
4.1 – Introdução ao Problema	89
4.2 – Probabilidades e suas Inter-relações	93
4.2.1 – Decomposição das Probabilidades $\{r_i   r_j\}$ e $\{S_i   r_i r_j\}$	93
4.2.2 – As Implicações das Suposições da Equação 4.4	96
4.2.3 – Significado das Influências entre os <i>Designs</i>	99
4.2.4 – Relações entre $\{S_i   r_i r_j\}$ e $\{S_i   r_i\}$	103
4.2.5 – Relações entre Diferentes $\{S_i   r_i r_j\}$	111
4.2.6 – Algumas Relações entre $\{S_i   r_i\}$	118
4.3 – Estratégia Ótima de Teste	121
4.3.1 – Alternativas Ótimas em $\underline{W}_i$ e $\underline{Y}_i$	121
4.3.2 – Alternativa Ótima no Ponto de Decisão $\underline{V}_i, i = 1 \text{ e } 2$	127
4.3.3 – Alternativa Ótima no Ponto de Decisão $\underline{U}$	141
4.4 – Análise de Pesquisas Empíricas Utilizando o Modelo de 2 <i>Designs</i> e 2 Testes	154
4.5 – Síntese e Conclusões do Capítulo	162
 <b>Capítulo 5 – SÍNTESES, CONCLUSÕES, CONTRIBUIÇÕES E SUGESTÕES</b>	 <b>163</b>
5.1 – Introdução	165
5.2 – Resultados, Contribuições e Limitações	166
5.3 – Sugestões para Pesquisas Futuras	169
 <b>BIBLIOGRAFIA</b>	 <b>171</b>

## Lista de Figuras

<b>Figura 1.1 – Processo de Desenvolvimento de Produto</b>	<b>03</b>
<b>Figura 1.2 – Objeto e Condições de Testes</b>	<b>05</b>
<b>Figura 3.1 – Árvore de Decisão do Problema de uma Alternativa e Dois Testes</b>	<b>60</b>
<b>Figura 3.2 – Diagrama de Venn da Situação 1</b>	<b>78</b>
<b>Figura 3.3 – Diagrama de Venn da Situação 2</b>	<b>78</b>
<b>Figura 3.4 – Valor Esperado em Função do Beta (<math>s = 0,7</math>)</b>	<b>84</b>
<b>Figura 3.5 – Valor Esperado em Função do Beta (<math>s = 0,3</math>)</b>	<b>85</b>
<b>Figura 4.1 – Árvore de Decisão do Problema com Dois <i>Designs</i> e Dois Testes</b>	<b>91</b>
<b>Figura 4.2 – Alternativa Ótima no Ponto <math>\underline{U}</math> em Função de <math>C_i</math> e <math>C_i</math></b>	<b>151</b>
<b>Figura 4.3 – Química Combinatória e Método Tradicional</b>	<b>158</b>
<b>Figura 4.4 – Circuitos Integrados: ASIC e EPLD</b>	<b>159</b>
<b>Figura 4.5 – Desenvolvimento de Medicamentos: Síntese Química e Biotecnologia</b>	<b>163</b>

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 2.1 – Comparação entre Química Combinatória e Método Tradicional</b>	<b>34</b>
<b>Tabela 2.2 – Nível de Conhecimento e Custo de Modificação</b>	<b>37</b>
<b>Tabela 3.1 – As Quatro Estratégias de Teste Imperfeito</b>	<b>61</b>
<b>Tabela 3.2 – Probabilidades <math>\{r_1   r_j r_3\}</math> das Duas Situações</b>	<b>79</b>
<b>Tabela 3.3 – Estratégias Sequenciais de Testes</b>	<b>80</b>
<b>Tabela 3.4 – Estratégias Paralelas de Testes</b>	<b>80</b>
<b>Tabela 4.1 – Estratégias de Teste</b>	<b>92</b>
<b>Tabela 4.2 – Determinantes da Relação entre <math>\{S_i   r_i r_j\}</math> e <math>\{S_i   r_j\}</math></b>	<b>107</b>
<b>Tabela 4.3 – Diferenças Extremas entre <math>\{S_i   r_i r_j\}</math> e <math>\{S_i   r_j\}</math></b>	<b>108</b>
<b>Tabela 4.4 – Alternativas e Valores Esperados nos Pontos de Decisão <math>\underline{W}_i</math> e <math>\underline{Y}_i</math></b>	<b>124</b>
<b>Tabela 4.5 – Alternativa Ótima e seu Valor Esperado em <math>\underline{W}_i</math> ou <math>\underline{Y}_i</math></b>	<b>128</b>
<b>Tabela 4.6 – Estratégias da Alternativa Testa <math>O_2</math> no <math>\underline{V}_1</math></b>	<b>131</b>
<b>Tabela 4.7 – Valor Esperado Ótimo de Testar <math>O_2</math> no Ponto <math>\underline{V}_1</math></b>	<b>133</b>
<b>Tabela 4.8 – Estratégia da Alternativa Testa <math>O_2</math> no <math>\underline{V}_2</math></b>	<b>138</b>
<b>Tabela 4.9 – Valor Esperado Ótimo de Testar <math>O_2</math> no Ponto <math>\underline{V}_2</math></b>	<b>139</b>
<b>Tabela 4.10 – Alternativas Ótimas nos Pontos de Decisão <math>\underline{V}_1</math> e <math>\underline{V}_2</math></b>	<b>141</b>
<b>Tabela 4.11 – As Quatro Situações Simuladas</b>	<b>143</b>
<b>Tabela 4.12 – Decisão Ótima e seu Valor Esperado no Ponto de Decisão <math>\underline{U}</math></b>	<b>145</b>
<b>Tabela 4.13 – Variando Custo de Teste nas Situações III e IV</b>	<b>148</b>
<b>Tabela 4.14 – Estratégia Ótima em Função da Influência entre <i>Designs</i></b>	<b>154</b>

**CAPÍTULO 1**  
**INTRODUÇÃO À PESQUISA**

## 1.1 – Introdução

A capacidade de lançar novos produtos que seduzem os consumidores e com um custo competitivo é uma das mais poderosas armas que uma empresa poderia empregar para concorrer num mercado globalizado (Clark e Wheelwright, 1993, p. 4). Já não basta ter qualidade e produtividade na fabricação de produtos existentes. É preciso ter também qualidade e produtividade em desenvolvimento e no lançamento de novos produtos (Pisano, 1997, p. 2), pois, dependendo do setor industrial, o desenvolvimento de um novo produto pode envolver bilhões de dólares e milhares de pessoas, e o resultado de um único produto, no mercado, pode determinar o destino da empresa como um todo.

Desenvolver com sucesso um novo produto é uma tarefa difícil e complexa, pois exige, em primeiro lugar, a integração entre a demanda dos clientes e a competência da empresa. Esta integração é dificultada pela incerteza sobre a demanda de clientes no futuro. Em segundo lugar, exige a integração entre diferentes funções dentro da organização. Para qualquer projeto de porte razoável, esta integração exige a coordenação de múltiplas decisões a serem tomadas pelos membros da equipe ao longo do tempo (Clark e Fujimoto, 1990). Adicionalmente, a progressiva fragmentação de mercados, a crescente complexidade e dinamismo das tecnologias introduzem mais turbulências na gestão de projetos de desenvolvimento de produtos.

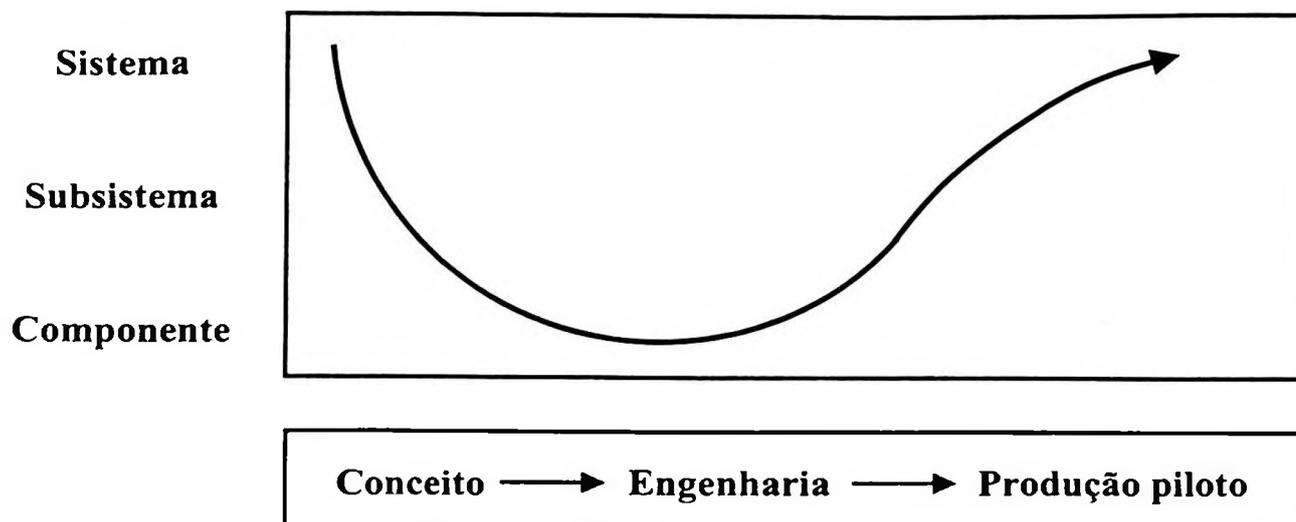
Esta pesquisa está focada em estratégias de testes na gestão de desenvolvimento de produtos (GDP). Mais especificamente, sobre o estudo das interações entre diferentes *designs* e tipos de testes na determinação da melhor estratégia de testes no desenvolvimento. Isto é, a pesquisa analisa como o resultado do teste realizado com uma alternativa de *design* pode influenciar a decisão subsequente de um teste de outro *design*. Antes de qualificar os objetivos e de descrever a abordagem adotada nesta pesquisa, a próxima seção fará uma breve introdução sobre GDP de modo a contextualizar a presente pesquisa e apresenta uma estrutura conceitual para facilitar a discussão sobre teste e experimentação em desenvolvimento. A Seção 1.3 define o problema de pesquisa, descreve a abordagem metodológica adotada e delimita o escopo do trabalho. Seção 1.4 discute os resultados obtidos e as contribuições desta pesquisa. Finalmente, a Seção 1.5 apresenta brevemente os capítulos deste trabalho.

## 1.2 – Gestão de Desenvolvimento de Produtos e a Importância de Testes

Há uma vasta literatura sobre desenvolvimento de produto que cobre várias áreas acadêmicas em administração, como a de administração de marketing, teoria de organizações, e gestão de operações. Excelentes artigos de revisão da literatura acadêmica em GDP, de

acordo com a perspectiva adotada, são o de Mahajan e Wind (1992) que cobre a administração de marketing; o de Brown e Eisenhardt (1995) que trata da teoria de organizações; o de Krishnan e Ulrich (2001) que aborda a gestão de operações e o de Gerwin e Barrowman (2002), que está focado em desenvolvimento integrado de produto. Cada uma dessas áreas de estudo possui uma perspectiva específica de análise. Esta pesquisa adota a perspectiva da administração de operações que trata o desenvolvimento de produto como uma seqüência de etapas, envolvendo várias iterações, começando com a idealização do conceito até a produção piloto antes do lançamento.

“*Design* e desenvolvimento de produto é um processo cognitivo e organizacional no qual artefatos são criados para aproveitar oportunidades de mercado, resolver problemas de negócio e atender necessidades humanas ou de sociedade” (Ulrich, 2001). Essa definição de desenvolvimento de produtos pode ser estendida, para incluir o desenvolvimento de processos produtivos e serviços, substituindo simplesmente a palavra “artefatos” por termos mais apropriados. Um projeto de desenvolvimento de produto geralmente envolve várias etapas sucessivas, às vezes superpostas, de atividades, para atingir seus objetivos. Essas atividades podem ser classificadas em diferentes formas, dependendo da perspectiva adotada. A classificação apresentada por Ulrich e Eppinger (1995, pp. 14-15), a partir de uma perspectiva de gestão das atividades predominantemente técnicas do projeto de desenvolvimento, incorpora as seguintes tarefas genéricas: 1) Desenvolvimento de conceitos – identificação das necessidades do mercado alvo, geração e avaliação de conceitos alternativos do novo produto, e seleção de alguns conceitos para a próxima etapa do projeto; 2) Projeto do sistema – definição da arquitetura do produto e seus subsistemas e componentes; 3) Projeto detalhado – especificações detalhadas de cada componente e subsistema, e respectivos processos produtivos; 4) Testes e melhoramentos – protótipos de componentes, subsistemas e sistema são construídos e testados, e os resultados desses testes são usados para melhorar o projeto; e 5) Preparação para o lançamento – produção piloto para identificar e corrigir problemas e treinar os operadores. Clark e Wheelwright (1993, p. 660) apresentam uma seqüência de tarefas de desenvolvimento similares que é representada por uma curva (vide Figura 1.1): o projeto de desenvolvimento geralmente começa com a definição do conceito no nível do sistema, passa por engenharia no nível do sistema (arquitetura do produto), depois a engenharia (detalhada) de subsistemas e componentes. Uma vez projetados os componentes e subsistemas, as tarefas subseqüentes são as de integração de componentes em subsistema, e de subsistemas em sistema, e, finalmente, a tarefa de produção piloto.



**Figura 1.1 – Processo de Desenvolvimento de Produto**

Fonte: Clarck e Wheelwright, 1993, p. 660

Clark e Wheelwright (1993, pp. 599-605) salientam que, em cada ponto, na curva da Figura 1.1 que representa o “caminho” do desenvolvimento, realizam-se testes para resolver problemas ou melhorar soluções naquela tarefa em desenvolvimento de produto. Em geral, em cada tarefa de desenvolvimento, o projetista passa por várias interações, cada vez aprendendo mais um pouco sobre o problema e as soluções alternativas, para convergir para o projeto final com as especificações detalhadas. Segundo esses autores, cada interação consiste de três fases: *design, build e test*<sup>1</sup>. Na fase de *design*, o projetista define as metas e gera as alternativas de projeto. A fase de *build* tem como objetivo transformar as alternativas de projeto em formas/objetos, isto é, em protótipos, que permitam a realização de teste. As formas ou objetos específicos podem ser implementados num *software* de *Computer Aided Design* (CAD) num estágio inicial de desenvolvimento, ou construídos com materiais mais fáceis de manusear, como plástico ou metais menos duros, e, num estágio final de desenvolvimento, executados com materiais e processos de produção que são similares ao processo comercial. Na fase de *test*, dependendo dos objetivos específicos do ciclo de *design-build-test* em questão, o teste pode centrar-se numa dimensão particular (por exemplo, medir o nível de ruído gerado pelo mecanismo) utilizando um protótipo focado ou pode envolver uma avaliação do sistema nas condições reais utilizando um protótipo completo<sup>2</sup> (Ulrich e Eppinger, 1995, pp. 219-221).

<sup>1</sup> Thomke e Fujimoto (2000) sugeriram um ciclo similar, mas com quatro fases: *design, build, run, e analyze*. Onde *run* significa a execução de teste.

<sup>2</sup> Os termos em inglês são respectivamente: *focused prototype* e *comprehensive prototype*.

O ciclo de *design-build-test* possui outro papel importante no desenvolvimento. De acordo com Leonard-Barton (1995, p. 114), essas atividades criam a “variedade essencial” (*requisite variety*) em produtos e processos, isto é, uma carteira diversificada de opções tecnológicas. Uma experimentação pode gerar resultados inesperados, ou entendimento sobre outro problema não relacionado com o teste em questão, que contribuem para a capacidade de resolução de problemas da empresa.

A atividade de experimentação ou de teste tem um importante papel em cada uma das etapas da gestão do projeto de desenvolvimento (Leonard-Barton, 1995, pp. 111-134). Para certos setores industriais, tais como o desenvolvimento de softwares, os custos de testes representam quase a metade dos investimentos em projetos de softwares (Shooman, 1983, apud Thomke e Bell, 2001). Baldwin e Clark (2000, pp. 271-280) mostraram que os custos de testes são determinantes no processo de *modularização* de projetos de desenvolvimento. Para evitar os altos custos de testes de protótipos completos, a solução encontrada pela indústria de computadores é o projeto modular.

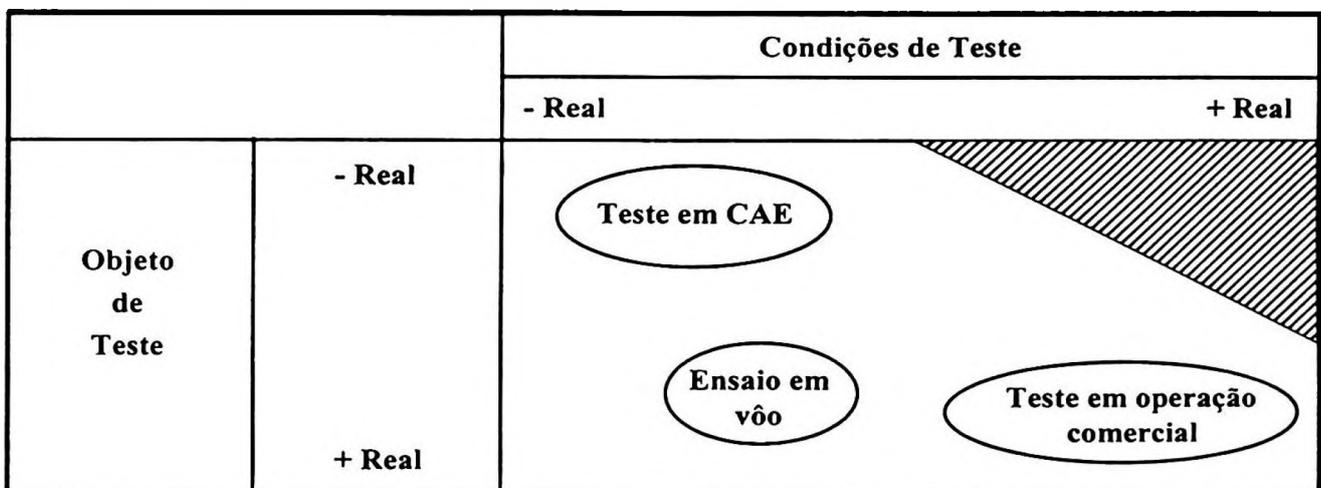
Nesta pesquisa, a tarefa genérica de teste no desenvolvimento de produto incorpora as fases de *design-build-test* de Clark e Wheelwright (1993). Cada ciclo de teste envolve não somente a execução do teste (*test*), mas também a sua preparação (fases de *design-build*) e a fase de análise e interpretação dos resultados (Thomke e Fujimoto, 2000).

Testes são realizados em cada tarefa, ou ponto, do processo de desenvolvimento (Figura 1.1) para avaliar as alternativas de projeto. Na definição de conceitos de um novo automóvel, testes são as avaliações, dos desenhos ou modelos em escala, por uma amostra de consumidores em potencial. Numa tarefa de desenvolver um subsistema, os testes são ensaios laboratoriais para medir certos parâmetros do mesmo. Finalmente, a tarefa de realizar produção piloto é geralmente uma série de ciclos de testes do novo sistema produtivo em termos do seu desempenho (produtividade, capacidade, etc.) e da qualidade do produto fabricado. Aparentemente, esses testes são bem diferentes entre si, mas, se forem analisados de uma forma mais abstrata, eles podem ser comparados conforme algumas dimensões comuns. Essas dimensões são: objetivo do teste, objeto do teste, condições ou ambiente do teste, e desempenho do teste, cada uma dessas dimensões são descritas, com mais detalhe, a seguir.

Cada teste deve ter seus objetivos preestabelecidos. São dois os principais tipos de objetivos de teste: 1) testar a receptividade do mercado em relação ao projeto do novo produto; e 2) testar a funcionalidade ou o desempenho técnico do projeto. Em outros termos, os testes são utilizados para estimar o desempenho técnico ou mercadológico do produto a ser

lançado. Na definição do conceito de um novo carro, o objetivo é selecionar o “melhor” conceito para o mercado alvo. Em testes de túnel de vento de uma nova aeronave, o objetivo é definir a aerodinâmica do avião, de modo a melhor atender aos requisitos de desempenho, tais como, atrito aerodinâmico e velocidade de cruzeiro. A definição dos objetivos de teste é importante para comparar e selecionar os tipos de testes mais apropriados.

Objeto de teste é a consubstanciação física ou virtual do *design* de um componente ou um sistema. No teste de conceitos de um automóvel, o objeto de teste pode ser um conjunto de maquetes feito em argila (objeto físico), ou um conjunto de desenhos confeccionados em papel ou em computador (objeto virtual). Nos testes em pista de prova de um novo caminhão, o objeto do teste é o próprio veículo, geralmente um dos protótipos do novo caminhão. Pode-se concluir que, em cada etapa de desenvolvimento, realizam-se testes com diferentes objetos. Esses objetos de testes podem ser uma representação virtual, de escala reduzida, ou o protótipo completo (Ulrich e Eppinger, 1995, pp. 219-221).



**Figura 1.2 – Objeto e Condições de Testes**  
**Fonte: Autor desta pesquisa**

Condições ou ambientes de teste são os aparatos e procedimentos utilizados para avaliar o objeto de teste. Em geral, procura-se testar os objetos em condições mais próximas das reais. Entretanto, por causa dos altos custos para testar em condições reais e da dificuldade em controlar as condições reais, muitos testes são realizados em condições laboratoriais, incluindo simulações digitais via *software* de *Computer Aided Engineering* (CAE). A principal vantagem de realizar testes em condições laboratoriais é a facilidade de controlar os experimentos, e a sua desvantagem é a não representatividade dos resultados em relação às condições reais de operação.

Combinando diferentes condições (de condições mais reais para condições menos reais) com diferentes objetos de teste, variando de “- Real” (menos real) para “+ Real” (mais real), para um mesmo objetivo de teste, podem-se representar essas possibilidades na Figura 1.2. A área hachurada indica o espaço de combinações inviáveis. Isto é, seria impossível testar um objeto virtual em condições reais. Alguns exemplos de testes em desenvolvimento de aeronaves são apresentados para ilustrar as possibilidades. Em teste utilizando CAE, tanto o objeto do teste como as suas condições são virtuais (programas de *software*), portanto, deve ser situado no extremo “- Real” dos eixos da Figura 1.2. Testando alguns subsistemas em operação comercial de uma aeronave, tanto o objeto como o ambiente de teste são reais. Nos ensaios em voo, o objeto de teste é real (geralmente um protótipo completo), mas o ambiente de teste é controlado (isto é, uma experimentação no campo), portanto, situado entre “- Real” e “+ Real”.

A última dimensão é o desempenho do teste, que é caracterizado por três parâmetros principais: custo de teste, prazo requerido para executar o teste e analisar o seu resultado, e a confiabilidade do teste. Um teste é melhor quando, comparado com outro, seu custo e prazo são menores e sua confiabilidade é maior.

O custo do teste envolve os gastos para construir o objeto de teste (fabricar o protótipo), para montar os aparatos, para elaborar os procedimentos de teste, para conduzir o teste (horas de engenharia, consumo de insumos como combustível e eletricidade, etc.) e para analisar os resultados (tempo de computação, horas de engenharia, etc.). Essa definição pressupõe que o custo de teste não depende somente do gasto na construção do objeto do teste (por exemplo, um protótipo físico), mas depende também da infra-estrutura de teste existente na organização ou no país. Em um país que não possui túnel de vento, o custo de realizar um teste aerodinâmico deve ser maior que o mesmo teste feito num país que conta com essa infra-estrutura laboratorial.

O prazo necessário para conduzir o teste e analisar seus resultados é um parâmetro cada vez mais importante, num mundo no qual os ciclos de vida dos produtos estão se reduzindo sucessivamente. Esse prazo é medido a partir da definição das especificações até a observação dos resultados de teste. Portanto, envolve a construção de protótipo, a montagem de aparatos de teste e a própria execução do teste.

O conceito de confiabilidade do teste é fundamental para esse estudo, mas exige uma definição um pouco mais precisa. O objetivo fundamental de um teste é estimar, a partir do seu resultado, o desempenho do novo produto, ou seu subsistema, em condições reais de operação. A confiabilidade do teste é uma medida da qualidade dessa estimativa. Um teste é

de maior confiabilidade quando a estimativa realizada pela equipe do projeto, a partir do resultado de teste, tem maior chance de ser correta. A confiabilidade de um teste depende de vários fatores, entre os mais importantes, podemos mencionar o objeto e as condições de teste. Em geral, quando o objeto e o ambiente de teste são mais distantes das condições reais de operação do novo produto, menos confiáveis serão os resultados do teste. Outro fator relevante é o conhecimento, da equipe do projeto, sobre as relações entre os resultados de testes e o desempenho real do novo produto em condições concretas. Maior conhecimento sobre essas relações implica, em geral, uma maior confiabilidade dos resultados de teste. Finalmente, um planejamento cuidadoso e ter habilidade em executar os testes também afetam a confiabilidade dos resultados (Clark e Wheelwright, 1993, p. 604).

A formalização da definição de confiabilidade do teste exige o uso do conceito de probabilidade condicional. Suponha que o objetivo de um teste é estimar o desempenho técnico de um novo produto na operação comercial (em condições reais). Para simplificar, esse desempenho real pode assumir somente dois estados: Bom (B) ou Mal (M). O objeto de teste é um protótipo do novo produto. O resultado desse teste assume também dois valores: Positivo (+) ou Negativo (-). A equipe do projeto que executa o teste observa somente o resultado do teste, + ou -, e precisa inferir o desempenho real, B ou M, a partir dessa informação. A confiabilidade do teste é então a probabilidade de ocorrer um determinado resultado de teste, dado um desempenho real. Em outros termos, a confiabilidade é representada pela probabilidade condicional  $\{\text{resultado de teste} \mid \text{desempenho real}\}$ <sup>3</sup>.

No exemplo do desempenho técnico, uma medida de confiabilidade do teste é a probabilidade de obter um resultado Positivo (+) dado que o desempenho é Bom (B):  $\{+ \mid B\}$ .

Quando um teste tem alta confiabilidade, essa probabilidade aproxima-se do valor 1,0 ou 100%. No outro extremo, quando o teste tem confiabilidade muito baixa, essa probabilidade aproxima-se do valor 0,5% ou 50%. Isto é, quando o desempenho é realmente B, a chance de ter resultado Positivo, no teste, é quase igual à de ter resultado Negativo.

Outras medidas de confiabilidade, para este exemplo, são:  $\{- \mid B\}$ ,  $\{+ \mid M\}$ , e  $\{- \mid M\}$ . A probabilidade condicional  $\{- \mid B\}$  é a probabilidade de “falso negativo”: a chance de o resultado do teste ser Negativo, dado o desempenho do produto ser Bom. Analogamente, a  $\{+ \mid M\}$  é a probabilidade de “falso positivo” do teste. Um teste de boa confiabilidade tem baixos valores de  $\{- \mid B\}$  e  $\{+ \mid M\}$ . Adicionalmente, a teoria de probabilidade estabelece as seguintes relações entre essas probabilidades:

---

<sup>3</sup> A representação convencional dessa probabilidade condicional é  $P(\text{resultado de teste} \mid \text{desempenho real})$ . A representação utilizada neste trabalho é mais compacta e foi criada pelo professor Ronald Howard, da Stanford University.

$$\{+ | B\} + \{- | B\} = 1, \text{ e}$$

$$\{+ | M\} + \{- | M\} = 1.$$

Antes de finalizar esta discussão sobre a caracterização de testes em desenvolvimento de produtos, é importante salientar o enorme impacto da evolução tecnológica em todas as atividades de desenvolvimento de produtos, particularmente em planejamento e execução de testes. A simulação computacional (CAD, CAE e CAM) está tornando os objetos de teste cada vez mais virtuais (Thomke, Holzner e Gholami, 1999); a tecnologia de prototipagem rápida está reduzindo cada vez mais os prazos de construção de protótipos (Survey, 2001); e a Internet está agilizando o processo de resolução de problemas técnicos em desenvolvimento e a avaliação de conceitos de novos produtos por consumidores<sup>4</sup>. Essas tecnologias estão reduzindo os custos e prazos de testes, e, ao mesmo tempo, aumentando a confiabilidade dos mesmos.

Finalmente, devem-se destacar duas características importantes de teste e experimentação: incerteza e conhecimento. O desenvolvimento de produtos exige que o projetista, ou a equipe de desenvolvimento, defina as suas especificações bem antes de conhecer o desempenho técnico do mesmo e as preferências dos consumidores em relação ao produto. Isso porque o desempenho técnico final e a preferência dos consumidores só são conhecidos após a introdução do novo produto no mercado. Como consequência, no momento de definição de parâmetros-chave do novo produto, a equipe geralmente tem dúvida sobre o potencial tecnológico e mercadológico do mesmo. Em outros termos, as decisões sobre especificações do novo produto são tomadas sob grandes incertezas técnicas e de mercado (Reinertsen, 1997, pp. 218-241). Para reduzir essas incertezas sobre o desempenho técnico e/ou a preferência do mercado, a equipe de desenvolvimento recorre a testes para adquirir mais informações, de modo a reduzir os riscos das suas decisões. Os dados resultantes de testes são empregados, pela equipe do projeto, para selecionar a melhor alternativa de projeto e/ou corrigir os problemas de projeto identificados.

A discussão acima mostra que a realização de testes fornece informação e conhecimento para a equipe, e, portanto, pode-se concluir que a necessidade de realizar testes é relacionada com o nível de conhecimento da equipe do projeto (Thomke, 2001, p. 68).

---

<sup>4</sup> A Eli Lilly, uma das maiores empresas farmacêuticas, opera, desde 2001, um fórum científico InnoCentive na Internet para discutir problemas técnicos e solicitar soluções junto à comunidade científica mundial. A empresa somente remunera as soluções corretas (Mullaney et.al., BusinessWeek, 12 de maio de 2003, pp. 60-68).

Essa relação pode ser mais bem ilustrada através do uso de uma personalidade hipotética: o projetista perfeito<sup>5</sup>. O projetista perfeito é aquela pessoa que possui todo o conhecimento necessário para prever, com perfeição, logo no início do projeto, os resultados técnicos e mercadológicos de uma alternativa de desenvolvimento (representada pelas suas especificações) bem definida. Isto é, desde que a pergunta sobre os resultados do projeto seja bem colocada, o projetista perfeito forneceria a resposta correta. Dada essa caracterização do projetista perfeito, podemos concluir que ele não precisa recorrer aos testes, durante o projeto, para estimar os resultados. Em outros termos, o seu conhecimento torna os testes desnecessários. Esse exercício lógico mostra claramente a existência de uma relação forte entre o nível de conhecimento e a necessidade de realizar testes no desenvolvimento de produtos. Várias pesquisas empíricas recentes mostraram essa relação de uma forma bem contundente e, adicionalmente, identificaram particularidades bem interessantes dessa relação, dependendo do setor industrial estudado<sup>6</sup>.

### 1.3 – Problema, Objetivos e Abordagem Metodológica da Pesquisa

Esta pesquisa foca na estratégia do teste no processo de desenvolvimento. A presente seção define um problema genérico de teste em desenvolvimento a partir dos conceitos discutidos na seção anterior. Este problema genérico de teste é a base na qual se desenvolverão os modelos matemáticos de teste e se discutirão as estratégias de teste, neste trabalho. Em seguida, a seção apresenta os objetivos deste estudo e, finalmente, discute a abordagem metodológica empregada.

O problema do teste a ser tratado refere-se a uma tarefa genérica no desenvolvimento de produto. Esta tarefa pode ser o desenvolvimento de um conceito do produto, de um componente, de um subsistema, ou até a tarefa de decidir lançar o produto ou realizar mais testes de mercado. Em termos da curva da Figura 1.1, uma tarefa é um ponto no processo de desenvolvimento de produto. Suponha-se que, neste problema de teste, as alternativas de projeto (ou de *design*) já são identificadas e a questão é como testá-las para selecionar a melhor. De acordo com Clark e Wheelwright (1993), cada tarefa, ou ponto da curva, pode envolver vários ciclos de *design-build-test* (DBT) interligados: o resultado de um ciclo pode influenciar as decisões do próximo ciclo. Por exemplo, suponha-se que o projeto de um componente Alfa contempla duas alternativas: AA e AB, e esta é uma variante da primeira.

---

<sup>5</sup> A idéia de projetista perfeito é uma extensão da figura de “clarividente”, na análise de decisão, criada pelo Ronald Howard (1984).

<sup>6</sup>O Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura pertinente à pesquisa.

Se o *design* AA passou pelo teste no ciclo anterior, então a chance do *design* AB passar no teste no ciclo atual deve mudar. Para cada ciclo, o projetista ou a equipe do projeto precisa decidir como vai realizar o teste, isto é, que alternativas de projeto devem ser testadas e que tipo de teste deve ser usado. Suponha-se que vários tipos de testes são disponíveis para a tarefa. Cada tipo de teste é caracterizado por seu objeto (ou protótipo) e suas condições/ambiente. A seleção de uma combinação de objeto, condições e objetivos de teste e o número de alternativas a serem testadas determina o desempenho do ciclo em termos de custos de teste, prazo requerido para execução e análise e confiabilidade dos resultados. Entretanto, esta seleção deve considerar não somente o desempenho do ciclo atual mas também a sua consequência nos próximos ciclos de DBT na mesma tarefa. Por exemplo, a estratégia de testar uma alternativa de *design* em cada ciclo, utilizando um determinado teste, denominada de “estratégia de teste seqüencial”, incorre um menor custo por ciclo, mas implicaria uma maior duração da tarefa como um todo. Na estratégia de teste seqüencial, o projetista pode tomar decisões diferentes, dependendo de resultados de teste do ciclo anterior, para melhorar o desempenho da tarefa. Por exemplo, o projetista pode mudar o tipo de teste ou abandonar a busca por melhor alternativa. Por outro lado, a estratégia de testar simultaneamente todas as alternativas no ciclo atual, denominada de “estratégia de teste paralela”, implicaria um maior custo no ciclo mas reduziria a duração total da tarefa. O objetivo do projetista ou da equipe é otimizar o desempenho da tarefa, e não o de cada ciclo individualmente, selecionando o tipo de teste e as alternativas de *design* a serem testadas para cada ciclo DBT, numa tarefa específica de desenvolvimento.

Para tornar os resultados da análise mais genéricos, cada tipo de teste é representado por seu custo de teste, sua duração requerida, e sua confiabilidade. A suposição é que qualquer teste, seja laboratorial ou de simulação computacional, pode ser caracterizado por esses três parâmetros. Adicionalmente, supõe-se que um tipo especial de teste é sempre disponível em cada ciclo de DBT: teste real ou teste perfeito. O termo real significa que o produto ou o componente desenvolvido é submetido a condições reais de operação. O teste real é inevitável para qualquer produto, subsistema ou componente que seja colocado no mercado. Como o teste real revela o sucesso ou o fracasso do produto, ele é totalmente confiável (confiabilidade de 100%) e, portanto, justifica o nome de teste perfeito. Em geral, um teste real custa e dura mais. Um dos testes reais mais conhecido é a prática de lançar o produto no mercado em lugar de realizar mais um estudo antes de apresentá-lo. Esta é a razão pela qual os termos “teste real” e “lançamento de produto” são sinônimos, neste trabalho. O desenvolvimento de um componente (ou subsistema) de um produto pode passar por um teste

real, realizado num laboratório, antes do seu lançamento, desde que os ensaios simulem todas as condições da operação real. Por outro lado, o teste real de um conceito do produto só pode ser realizado depois do lançamento. Outros testes são chamados de testes imperfeitos, pois apresentam confiabilidades menores que 100%.

Dada a definição do problema genérico do teste no desenvolvimento anterior, passa-se a apresentar os objetivos da presente pesquisa. Para uma tarefa de desenvolvimento com várias alternativas de projeto e diversos tipos de testes (incluindo um teste real), os objetivos principais desta pesquisa são: 1) Identificar os parâmetros-chave na determinação da estratégia ótima de teste e entender as inter-relações entre esses parâmetros; e 2) Analisar o comportamento da estratégia ótima em função desses parâmetros. Mais especificamente, a pesquisa procura analisar as influências entre as alternativas de *design* e entre os tipos de testes na determinação da estratégia ótima de teste. Uma alternativa pode “influenciar” a outra através do resultado do teste, desde que as duas estejam relacionadas, isto é, as duas possuam similaridades relevantes em seus *designs*. A similaridade pode estar em princípios físicos, em estilo, em materiais utilizados, em fornecedor, etc. Neste caso, se uma alternativa teve um bom desempenho no teste, então a chance da outra conseguir o bom desempenho, no mesmo teste, aumenta<sup>7</sup>. Conseqüentemente, os resultados dos testes de ciclos anteriores devem ser aproveitados pelo projetista para tomar decisões sobre os testes a serem realizados nos ciclos subseqüentes. Um objetivo específico desta pesquisa é definir rigorosamente esses parâmetros de influência e determinar seu impacto na estratégia ótima de teste.

A abordagem metodológica adotada nesta pesquisa é a modelagem matemática de problemas genéricos de teste. De acordo com a revisão da literatura de desenvolvimento de produtos, na perspectiva de administração de operações, de Krishnan e Ulrich (2001), Ulrich (2001) classificou as abordagens metodológicas de pesquisa nesta área em três níveis: a primeira é a abordagem empírica. Estudos de casos, levantamento e análise de dados via questionários, entrevistas ou fontes secundárias são as principais metodologias utilizadas para descrever e explicar fenômenos relacionados com o desenvolvimento de produtos e processos nas organizações. A segunda abordagem é a elaboração de sistema de apoio à decisão em desenvolvimento de produtos. O objetivo desta abordagem é construir ferramentas que os executivos de desenvolvimento de produtos podem utilizar para melhorar o desempenho do seu sistema de inovação. A terceira abordagem é a que Ulrich (2001) denominou de *insight models*; ou seja, esforços de elaborar modelos matemáticos abstratos que procuram: 1)

---

<sup>7</sup> Uma analogia com a Formula 1: supondo que o pneu é a chave para o sucesso numa determinada corrida, e se um carro que utiliza pneus da marca *M* teve um bom desempenho num treino, então a chance de bom desempenho de outro carro, da outra equipe, que usa a mesma marca de pneu aumenta.

Entender certos fenômenos de desenvolvimento de produto simulando-os no computador; e 2) Fornecer orientações gerais para as tomadas de decisões gerenciais específicas. A presente pesquisa, de acordo com o julgamento deste autor, pertence a esta última categoria. É importante salientar que estas três abordagens são complementares. A construção de modelos matemáticos só é possível a partir de conhecimentos acumulados pelas pesquisas empíricas. Caso contrário, o modelo matemático não será útil para o entendimento dos fenômenos. Por outro lado, os modelos matemáticos e os sistemas de apoio à decisão podem fornecer sugestões para as pesquisas empíricas futuras.

A partir da revisão da literatura acadêmica, tanto para as pesquisas empíricas como para as de modelagem matemática (vide Capítulo 2), sobre o uso de testes em desenvolvimento de produtos, vários modelos de problemas de teste são elaborados. A base metodológica para a elaboração dos modelos é a análise de decisão, particularmente a modelagem de incerteza empregando a teoria de probabilidade<sup>8</sup>. Procurou-se trabalhar com modelos mais simples, para facilitar a análise e o entendimento dos resultados. Esses modelos representam problemas genéricos de teste com uma ou duas alternativas<sup>9</sup> de *design* e um a três tipos de testes, incluindo sempre um teste real para cada modelo. Os problemas de testes com até dois *designs* e até três tipos de testes são os mais simples possíveis para permitir a análise das influências entre as alternativas e entre os testes. Um entendimento dessas influências em modelos mais simples constitui a base para estudar problemas de testes envolvendo muitas alternativas e diversos tipos de testes. A análise da estratégia ótima de teste de cada modelo é realizada por derivação matemática ou simulação computacional. A derivação matemática permite um melhor entendimento das relações entre as variáveis, e a simulação computacional possibilita a exploração de detalhes de modelos.

#### 1.4 – Resultados e Contribuições

Os resultados desta pesquisa podem ser divididos em dois grupos distintos: o primeiro grupo é composto de modelos matemáticos elaborados para representar o problema genérico de teste numa tarefa de desenvolvimento. Estes modelos, que capturam os aspectos mais relevantes do problema de teste descritos na literatura acadêmica, permitem a identificação e a especificação dos parâmetros-chave de influência entre as alternativas e os testes.

---

<sup>8</sup> O nível de matemática empregado é o do livro de R. T. Clemen e T. Reilly: *Making Hard Decisions with Decision Tools*, Segunda Edição, Duxbury, 2001, utilizado na disciplina de “Análise de Decisões sob Incerteza Aplicada à Administração” (EAD-5853), Programa de Pós-Graduação do Departamento de Administração, FEA, USP.

<sup>9</sup> Allen (1966) mostra que os engenheiros de desenvolvimento consideram, na média, duas alternativas de soluções para um mesmo problema durante o projeto.

O segundo grupo é constituído de conclusões e entendimentos, ou *insights*, de acordo com Ulrich (2001), a partir de análise e simulação dos modelos, entre os quais pode-se mencionar: 1) A estratégia de lançamento seqüencial (realizar testes reais na seqüência) é ótima quando o custo do teste real é relativamente baixo, e o teste imperfeito tem um custo alto e baixa confiabilidade. Esta é uma situação típica quando há pouco conhecimento sobre a tecnologia do produto ou quando inexiste a infra-estrutura laboratorial; 2) Uma maior influência positiva entre as alternativas de *design* não favorece o uso de testes imperfeitos (teste laboratorial, simulação digital, etc.); e 3) A relação do custo do teste real sobre o retorno obtido com o sucesso da tarefa é um parâmetro-chave que determina a estratégia ótima de teste. O baixo custo do teste real incentiva o lançamento direto do produto, ou componente. Um custo intermediário de teste real promove o uso de testes imperfeitos, e um alto custo de teste real força o abandono do projeto.

As principais contribuições desta pesquisa para estudos sobre estratégia de teste em desenvolvimento de produtos são<sup>10</sup>:

- Incorporação da seleção do tipo de teste a ser realizado na estratégia de teste no desenvolvimento – os modelos matemáticos de teste da literatura são baseados principalmente na teoria de busca (*search*) que trabalha com um único tipo de teste. A disponibilidade de diversos testes no modelo possibilita a análise de estratégia com diferentes tecnologias de testes.
- Identificação e especificação de parâmetros de influência entre as alternativas de *design* – o sucesso observado de um *design* pode influenciar a chance de sucesso do outro *design*. Isto pode ocorrer quando os dois *designs* são relacionados de alguma maneira. Exemplos de relacionamento positivo entre *designs* são: os dois têm o mesmo estilo, ou os dois incorporam o mesmo princípio técnico. Estes parâmetros são denominados de influência entre designs no presente estudo. A literatura existente trabalha com a suposição simplificadora de independência probabilística entre os *designs*. Isto é, ao observar o sucesso de um *design*, a chance de sucesso de outro *design* não se modifica, no julgamento do projetista.
- Identificação e especificação de parâmetros de relacionamento entre os testes – o resultado observado de um teste pode influenciar a chance de ocorrer um determinado resultado de outro teste para o mesmo *design*. Isto pode acontecer quando dois testes são

---

<sup>10</sup> O Capítulo 2 deste trabalho destaca as diferenças entre a abordagem desta pesquisa com as da literatura existente.

relacionados de alguma maneira. Por exemplo, se um *design* aerodinâmico de um carro teve um resultado bom em simulações no CAE (Computer Aided Engineering), então a chance de obter um bom resultado em ensaios de túnel de vento, do mesmo *design*, provavelmente aumentaria. Estes parâmetros são denominados de confiabilidades condicionadas neste trabalho. A proliferação de novas tecnologias de testes torna o entendimento sobre a interferência entre os resultados de testes importantes.

- Desenvolvimento das relações probabilísticas entre as influências entre designs e as confiabilidades condicionadas com outras probabilidades importantes do problema de teste. Estas relações são importantes para determinar a estratégia ótima de teste.
- Elaboração de modelos matemáticos de testes incorporando os parâmetros e as relações acima. Estes modelos são utilizados para analisar o comportamento da estratégia ótima de testes em função dos parâmetros fundamentais tais como as influências entre designs e as confiabilidades condicionadas. Os modelos desenvolvidos podem ser usados para analisar algumas pesquisas empíricas.

## 1.5 – Apresentação dos Capítulos

Os capítulos deste trabalho são organizados na seguinte seqüência: no Capítulo 2 apresenta-se a revisão da literatura de testes em GDP dividida em duas partes: pesquisas empíricas e modelos analíticos. Adicionalmente, a primeira seção do Capítulo 2 revisa a discussão na literatura sobre teste e experimentação fora do âmbito de GDP. No Capítulo 3 desenvolve-se e analisa-se os modelos com uma única opção de *design*, mas com um, dois e três tipos de testes disponíveis. No modelo de três tipos de testes, o conceito de confiabilidade condicionada entre os testes é introduzido. Um dos objetivos secundários deste capítulo é introduzir a formulação matemática dos modelos e os símbolos empregados. No Capítulo 4 elabora-se e analisa-se o modelo de problema de testes com dois *designs* e dois tipos de testes. Este modelo é o mais complexo e introduz o conceito de influência entre os *designs*. Analisa-se a estratégia ótima de teste em função das diversas situações típicas de desenvolvimento de produtos. Na parte final desse capítulo, a estrutura conceitual do modelo é usada para entender três pesquisas empíricas sobre a estratégia de testes. Finalmente, o Capítulo 5 apresenta as conclusões desta pesquisa e sugere linhas de pesquisas futuras em estratégia de teste no desenvolvimento de produtos.

**CAPÍTULO 2**

**REVISÃO DA LITERATURA**

## 2.1 – Introdução

Esta revisão é focada em literatura de pesquisa sobre a gestão de testes em desenvolvimento de produtos. Essa literatura pode ser subdividida em dois tipos de pesquisas: as empíricas, que incluem os estudos de casos, levantamentos estatísticos longitudinais ou *cross sectional* e outros, que procuram descrever e explicar os fenômenos relacionados com testes em desenvolvimento de produtos; e as analíticas, em que modelos matemáticos ou computacionais são elaborados, a partir de uma abstração da realidade, e analisados, para entender as relações entre diferentes variáveis e obter soluções ótimas que possam subsidiar decisões gerenciais.

Entretanto, a experimentação, ou a realização de teste, numa definição mais ampla, é comum em outras atividades humanas, assim como o desenvolvimento de produto e processo. Psicólogos estudam a experimentação como um meio de resolução de problemas utilizado por seres humanos e animais. Os economistas a estudam como parte do processo de aprendizagem dos agentes econômicos. A próxima seção traz uma breve síntese dessas discussões sobre a experimentação fora da área da gestão de desenvolvimento de produto. O objetivo é conhecer visões diversas sobre o mesmo tipo de problema, apesar das diferenças de contexto.

As Seções 2 e 3 revisam a literatura de pesquisa sobre a experimentação e teste em desenvolvimento e são as partes centrais deste capítulo. A primeira trata das pesquisas empíricas e, a segunda lida com os estudos analíticos. Finalmente, a seção 4 contém uma síntese da revisão e uma avaliação da mesma do ponto de vista dos objetivos desta pesquisa.

## 2.2 – Experimentação e Aprendizagem em Geral

Esta seção procura caracterizar a atividade de teste, ou experimentação, num contexto mais amplo. O objetivo é colocar a experimentação para o desenvolvimento de um produto numa perspectiva de administração. A revisão da literatura permitiu identificar discussões sobre esse assunto em várias áreas de pesquisa acadêmica, particularmente em economia, psicologia e outras áreas de administração. Dado o espaço disponível, esta revisão não pretende ser exaustiva. Apesar de ter terminologias distintas das de gestão de desenvolvimento de produtos (GDP), essas áreas de estudo discutem essencialmente as mesmas questões.

Simon propõem uma definição muito genérica do termo *design*: “*Everyone designs who devises courses of action aimed at changing existing situations into preferred ones.*”<sup>11</sup>

---

<sup>11</sup> Uma tradução livre desta frase é: “*Design é a criação de alternativas de ação objetivando melhorar as condições existentes*”

(Simon, 1981, p. 129) De acordo com essa definição, o desenvolvimento de produto e do processo certamente é uma atividade de *design*, bem como a formulação de uma política pública do tipo Fome Zero. A partir dessa definição da atividade de *design*, Simon prossegue na sua caracterização genérica. As principais são: a) o projetista (quem realiza o *design*) sabe o que ele quer, isto é, ele pode estabelecer objetivos para o *design*. Um dos objetivos do projetista é a economia no uso de recursos para executar o *design*; b) o processo de *design* envolve duas tarefas principais: a busca de soluções e a avaliação das mesmas em relação aos objetivos; e c) o processo é interativo, pois uma seqüência de buscas e avaliações geralmente é executada antes que o projetista esteja satisfeito com a solução final.

Os estudos sobre a resolução de problema, em psicologia, estão também relacionados com a presente pesquisa. Para a psicologia, uma pessoa tem um problema a resolver quando ela estabelece um objetivo, mas não sabe como atingi-lo (Baron, 1994). Baron argumenta que toda resolução de problema envolve buscas por possibilidades e avaliação de cada uma, de acordo com evidências e metas. Adicionalmente, pode-se dizer que toda resolução de problema é um processo de tentativas e erros. Utiliza-se o método de tentativas e erros por falta de entendimento do problema. As tentativas não são escolhidas aleatoriamente, mas, geralmente, são guiadas por intuição, instinto ou conhecimento parcial (*partial insight*). Outro método genérico de resolução de problema é o de “subir a montanha” (*hill climbing*), em que o objetivo é chegar até o topo da montanha com olhos vendados<sup>12</sup>. A pessoa pode dar um passo para qualquer direção. Se o resultado for uma redução da altitude, ela pode dar um passo na direção contrária e assim sucessivamente. Esse método fornece informação, em cada passo, sobre o progresso no atendimento da meta, e esta é a principal diferença com o de tentativas e erros (Baron, 1994, p. 51 - 61).

Nos estudos em outras áreas de administração, vários autores abordam questões análogas à experimentação/teste em desenvolvimento de produto.

McGrath (1999) propõe que as empresas, ao decidir sobre novos empreendimentos, devem deixar de preocupar-se apenas em obter sucesso e evitar o fracasso. Elas devem ter uma visão mais integrada de como os dois fenômenos estão relacionados. Esses investimentos devem ser tratados como experimentos. A autora mostra que vários casos reais de fracassos reduziram significativamente as incertezas técnicas e mercadológicas de lançamentos de negócios subseqüentes, os quais se tornaram grandes sucessos. Os fracassos permitiram um acúmulo de conhecimento sobre o mercado e a tecnologia. Portanto, os fracassos possibilitaram a aprendizagem, e os esforços de evitar fracassos podem sacrificar

---

<sup>12</sup> E usando sapatos especiais, que não permitem a pessoa sentir a inclinação do solo.

oportunidades. Ela sugere o emprego do conceito de opção real para tratar essas decisões estratégicas de negócios.

Nos estudos descritivos sobre a tomada de decisão estratégica ou política, os trabalhos de Mintzberg, Raisinghani e Théorêt (1976) e Lindblom (1959) foram dois dos pioneiros. Mintzberg e seus colegas estudaram 25 decisões estratégicas e os resultados sugerem que o processo da tomada de decisão estratégica é caracterizado pela novidade, complexidade e indefinição (*openendedness*). O fato é que a organização inicia o processo com pouco entendimento da situação decisória a ser enfrentada, com desconhecimento de como resolver o problema, com uma idéia vaga do que seja uma solução e como ela seria avaliada, uma vez desenvolvida. Somente depois de um processo difícil, envolvendo várias idas e voltas, inclusive passos falsos e eventos imprevistos, uma decisão final é tomada. Esta não é a tomada de decisão sob incerteza, do livro texto convencional, mas é a tomada de decisão sob um clima de ambigüidade, no qual quase nada é dado ou facilmente determinado. Um estudo sobre decisões estratégicas de informática, em quatro empresas brasileiras, chegou a conclusões similares (Bataglia e Yu, 2002). Lindblom (1959) mostra que as políticas públicas são desenvolvidas de forma incremental. É um processo de aproximações sucessivas em que a política é ajustada continuamente aos eventos inesperados e objetivos mutantes. Esse processo é radicalmente diferente dos processos racionais de formulação de política pública.

Logo depois de publicar o trabalho sobre as 25 decisões estratégicas, Mintzberg cunhou o termo Estratégia Emergente (*Emergent Strategy*) para denominar os processos de formação de estratégia empresarial observados nas suas pesquisas. Ele define a estratégia como “um padrão numa seqüência de decisões” (Mintzberg e Waters, 1985<sup>13</sup> *apud* Mariotto, 2000). Esse é um processo não planejado, não formalizado e indefinido de desenvolver a estratégia corporativa, muito diferente de processo deliberado de desenvolver uma estratégia como é apresentado por Porter (1985) e muitos outros autores, mas mais próximo do método de tentativas e erros. Atualmente, os estudos sobre as estratégias emergentes constituem uma área muito ativa de pesquisa em estratégia empresarial (Mariotto, 2000).

Na área de gestão de conhecimento e aprendizagem organizacional (Garvin, 2000; Bohn, 1995), a experimentação é considerada como uma das formas mais ativas de aprendizagem. Particularmente, quando conceitos novos ou teorias ainda não comprovadas são envolvidos, a experimentação é utilizada para gerar informação e conhecimento.

---

<sup>13</sup> MINTZBERG, H., WATERS, J. A. Of strategies, deliberate and emergent. *Strategic Management Journal*, 6(3): 257-272, 1985.

A experimentação inicia-se com a modificação das condições do problema, depois, os impactos dessa modificação são observados e conclusões são obtidas. É comum existirem várias tentativas de modificação, observação e conclusão. Garvin comenta que a experimentação envolve riscos, pois a modificação de condições não garante um resultado favorável. Fracasso é sempre uma possibilidade, com a experimentação (Garvin, 2000, p. 140).

### **2.3 – Pesquisas Empíricas sobre Testes em Desenvolvimento de Produtos**

Pesquisas empíricas sobre o papel dos testes na gestão de desenvolvimento de produtos podem ser categorizadas em três grupos, de acordo com o tópico de estudo. Essa classificação é relacionada, aproximadamente, com os objetos de pesquisa. O primeiro grupo é composto de pesquisas que procuram acompanhar minuciosamente as decisões e os procedimentos de resolução de problemas dos projetistas/engenheiros durante o desenvolvimento de produto. Essas atividades requerem muitas vezes a utilização de testes de vários tipos. Essas pesquisas geralmente estudam um projeto, ou parte do mesmo, quase no tempo real. Os engenheiros e cientistas são entrevistados ou respondem a questionários periodicamente, enquanto o projeto está progredindo. O segundo grupo de pesquisas trata a atividade de teste como parte do sistema ou processo de desenvolvimento de produtos. Os objetos de pesquisa são geralmente a organização ou o sistema de desenvolvimento de produtos. O terceiro grupo de pesquisas procura entender as estratégias de testes adotadas pelas equipes de desenvolvimento de produtos. Esses estudos geralmente analisam dezenas ou até centenas de projetos de desenvolvimento e procuram identificar padrões de estratégias de testes e as causas desses comportamentos.

#### **2.3.1 – Pesquisas sobre a Tomada de Decisão e Resolução de Problema**

Um dos pioneiros nos estudos sobre a tomada de decisão e resolução de problemas em desenvolvimento de produtos é o trabalho do Marples (1961). O objetivo do estudo é entender, em detalhes técnicos, como os engenheiros enfrentam e resolvem os problemas de engenharia durante o projeto. Através do estudo em profundidade, de dois projetos de equipamentos industriais, Marples procurou desenvolver um modelo conceitual genérico de tomada de decisão em engenharia.

Marples concluiu que um projetista (*designer*) executa, repetitivamente, duas tarefas-chaves no processo de desenvolvimento: a primeira tarefa é a busca por possíveis soluções para o problema; e a segunda tarefa envolve a análise e a seleção de soluções. A busca de

soluções é baseada na crença de que uma solução melhor existe. Por causa da pressão do tempo, o projetista busca primeiramente uma combinação das soluções existentes. Essa busca é limitada pela capacidade cognitiva do projetista e depende também da sorte. O método de tentativa e erro pode ajudar a gerar soluções e a busca pode ser mais ou menos aleatória.

Muito tempo do projetista é dedicado à análise dos impactos das soluções propostas, o que exige um esforço dobrado de imaginação, pois ele precisa idealizar o produto final, as diferentes situações às quais esse produto deve se submeter durante a sua vida útil e as conseqüências finais (em termos de custos de operação, vida útil, venda, etc.) para o produto. O projetista utiliza ferramentas para auxiliá-lo a imaginar. As ferramentas básicas<sup>14</sup> são: desenhos e modelos (para visualizar o projeto), estimativas e cálculos de engenharia, e testes (para prever o comportamento do *design*). Nenhum teste reproduzirá todas as situações operacionais de um produto. Adicionalmente, as estimativas só podem ser feitas para os problemas percebidos pelo projetista. Marples afirma que a capacidade de perceber problemas é uma das principais contribuições da experiência e tem um forte impacto sobre a redução de custos e prazo de um projeto.

Marples identificou uma estrutura hierárquica de decisões para resolver os problemas de projeto. Essa estrutura começa com um desajuste qualquer de projeto como, por exemplo, eliminar vazamento em uma válvula<sup>15</sup>. Várias soluções são então propostas pela equipe do projeto: usar melhor os componentes da válvula ou utilizar um material vedante. Cada uma dessas soluções pode ter seus problemas específicos – Marples os denomina de subproblemas. Por exemplo, maior precisão na usinagem implicaria maior custo e prazo do projeto; o uso de vedante poderia contaminar o sistema. Os subproblemas precisam também ser solucionados, e, assim, se forma uma hierarquia de problemas e decisões. Para analisar e selecionar as soluções iniciais (usar melhor ou utilizar vedante), o projetista responsável precisa avaliar, em princípio, todos os subproblemas e suas possíveis soluções na hierarquia. Isso pode ser uma tarefa muito complexa. Os testes, no sentido amplo do termo, são então utilizados para ordenar as soluções possíveis de cada subproblema.

Outro pesquisador que contribuiu significativamente para o entendimento do processo de resolução de problemas em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) foi Thomas J. Allen. Ele e seus colegas do MIT realizaram vários estudos minuciosos sobre as atividades técnicas e formas de comunicação, entre os engenheiros, dentro de projetos de desenvolvimento (Allen, 1966; Frischmuth e Allen, 1969). No estudo de 1966, três pares de projetos paralelos são

---

<sup>14</sup> CAD e CAE, provavelmente, não existiam no início da década de 1960.

<sup>15</sup> Exemplo criado por este autor para facilitar a explanação.

contemplados<sup>16</sup>. Cada par de projetos envolveu duas equipes para atacar o mesmo problema de *design*. Os dados foram coletados através de um formulário, respondido semanalmente por engenheiros, que solicitava ao respondente uma estimativa da probabilidade de que cada uma das alternativas em consideração seria realmente a solução do problema técnico em questão. Os resultados mostram que as equipes de P&D consideram, durante a evolução do projeto, de uma a oito abordagens para um determinado problema. A média é de 3,33, sendo duas disponíveis desde o início do projeto e as outras 1,33 surgem mais tarde. Na média, somente duas alternativas são consideradas simultaneamente.

Outro resultado relevante desse estudo: informações novas afetam drasticamente a percepção da equipe sobre a viabilidade de diferentes abordagens. Os eventos de informação levantados, para um projeto específico, são: resultados de um experimento; resultados de análise aerodinâmica; resultados de análise eletromagnética; relaxação da especificação (resultante da negociação com o cliente); informação sobre a capacidade do equipamento de fabricação; dados sobre as condições reais de operação do equipamento; e estudo de *trade-off* (por exemplo, entre o peso e o custo do produto). Esses dados mostram que testes, de diferentes naturezas, constituem uma das fontes mais importantes para selecionar alternativas no processo de desenvolvimento. Allen (1966) aponta que, nos seus casos, as equipes que geram mais eventos informacionais, por unidade de tempo, geralmente chegam mais rapidamente à solução final.

O capítulo 6 do livro do Iansiti (1998) examina os mecanismos microscópicos através dos quais o processo de integração tecnológica é associado a melhores desempenhos de projeto e de produto. Integração tecnológica é o conceito chave do livro do Iansiti. Ele o indica assim: “Integração tecnológica é definida como um conjunto de atividades de investigação, avaliação, e melhoramento que procuram criar uma sintonia entre as opções tecnológicas e o contexto de aplicação. (...) Este processo deve definir o projeto, elaborar um mapa (*road map*) para orientar design e as tarefas de desenvolvimento” (Iansiti, 1998, p. 21). O foco deste capítulo é a observação detalhada dos processos de resolução de problemas através de estudos de casos e dois estudos de interesse são aqui relatados. O primeiro estudo trata do problema de empenamento de módulo de processamento e o segundo analisa a rota de resolução de problemas.

Uma breve descrição do problema de empenamento facilita o entendimento das conclusões de Iansiti: dois fabricantes de computadores de grande porte (*mainframes*)

---

<sup>16</sup> Prática comum das organizações governamentais dos EUA (por exemplo, a NASA) de contratar duas empresas para desenvolver soluções para o mesmo problema.

enfrentam o mesmo problema de empenamento de módulo de processamento em projetos tecnicamente iguais, que utilizam os mesmos tipos de materiais e que procuram atingir níveis de desempenho similares. Nos dois projetos, as equipes detectaram o problema de empenamento de módulo logo no início da integração tecnológica.

A primeira empresa enfrentou o problema com a montagem de uma força-tarefa composta de cientistas de materiais para resolvê-lo. Alguns cientistas de renome internacional em materiais cerâmicos são membros da força-tarefa. Eles começaram com experimentos em escala laboratorial e, depois de alguns meses de trabalho, conseguiram eliminar o problema, alterando as composições e o processo de sinterização. Infelizmente, a transferência desse *know-how* para a escala piloto não produziu os resultados esperados: o empenamento voltou a aparecer. A mesma equipe voltou a atacar o problema. Depois de vários meses de trabalho, o caso foi resolvido e o processo foi implantado numa planta comercial. Como as condições de uma planta comercial diferem muito da planta piloto, o empenamento surgiu novamente. A equipe foi chamada de volta e, depois de alguns meses, o problema foi finalmente sanado. Na final das contas, esses problemas de empenamento atrasaram o projeto por 18 meses e exigiram muitos homens/ano de trabalho além dos previstos.

A segunda empresa enfrentou o empenamento com a própria equipe do projeto, composta de especialistas com formação e experiência diversificadas, que conhecem bem a planta comercial e têm acesso a ela para realizar experimentações. O primeiro passo da equipe foi produzir um módulo protótipo na planta comercial, no qual puderam observar e caracterizar o empenamento. Depois de muita discussão e *brainstorming*, o grupo chegou à conclusão de que o empenamento não atrapalharia a produção em escala comercial, desde que uma superfície plana fosse criada no módulo. Alguém, então, sugeriu que uma camada de polímeros poderia ser colocada sobre o módulo. Essa solução criou uma etapa a mais na linha de produção, mas eliminou completamente o problema de empenamento. A empresa conseguiu introduzir o novo módulo um ano antes da outra empresa.

Esse caso mostra duas abordagens distintas de resolução de problemas. A primeira foca na causa raiz do problema e as soluções são buscadas para eliminá-la. A segunda define o problema de forma mais ampla e busca soluções que integram diversas partes do sistema. Uma conclusão de Iansiti é que: “De um lado, é importante identificar a causa raiz de um problema para determinar o seu impacto, de outro lado, para resolver o problema, não é obrigatório atacar somente a causa raiz”. (Iansiti, 1998, p. 106) Aproveitando as muitas opções oferecidas por um sistema de produto complexo, problemas podem ser eliminados eficazmente tirando vantagem da complexidade. A partir da análise desses casos, Iansiti

comentou sobre a forma tradicional de treinar engenheiros: "... a educação de engenheiros, que enfatiza solução fechada para problemas simples, pode resultar em incapacidade de reconhecer novas formas de soluções para problemas complexas" (Iansiti, 1998, p.107). Esses resultados de Iansiti indicam que, na utilização de testes para resolver problemas, é muito importante definir o escopo do problema. O tipo de testes a ser empregado depende dessa definição do escopo, como foi bem ilustrado pelo caso de empenamento de módulos de processamento.

O segundo estudo de interesse de Iansiti (1998) é o da análise da rota de resolução de problema. O estudo é baseado em 61 casos de resolução de problemas encontrados no levantamento dos projetos de desenvolvimento de processadores de *mainframes*. O autor entrevistou vários participantes, por caso, e examinou os documentos relevantes. Os problemas selecionados são os considerados mais difíceis tecnicamente pelos gerentes de engenharia.

Para avaliar a rota de resolução de problemas, ele considerou dois tipos de domínios de conhecimento: fundamental (independente do contexto) e contextual. Através de consultas aos especialistas em *mainframe*, Iansiti identificou seis domínios fundamentais, que são baseados em disciplinas já estabelecidas em engenharia e ciências aplicadas: material cerâmico, material semicondutor, metalurgia, química de polímeros, estrutura mecânica e engenharia térmica. Além desses, identificou também três domínios de conhecimento que dependem do contexto específico de cada empresa: arquitetura e sistemas de *mainframes*, processo de manufatura, e competência de fornecedores da empresa. Esses conhecimentos são mais dinâmicos, eles se modificam mais rapidamente do que os fundamentais.

Uma rota de solução é definida como "estreita", quando somente um domínio é utilizado, e como "ampla", quando mais de um domínio é utilizado. Adicionalmente, o autor definiu uma rota como contextual quando pelo menos um domínio contextual é utilizado na resolução do problema, caso contrário, a rota é definida como independente do contexto. Algumas conclusões relevantes de Iansiti, utilizando essas classificações de domínios e analisando os dados coletados, são: (1) Resolução de problema e desempenho de projeto - maior amplitude no uso de domínios de conhecimento é relacionada com o menor uso de recursos e menor prazo de projeto; maior amplitude contextual é relacionada com o menor consumo de recursos e menor prazo (correlação altamente significativa); (2) Resolução de problema e desempenho de produto: - maior amplitude contextual é relacionada com o melhor desempenho do produto; e (3) Resolução de problema e processo organizacional - um resultado interessante foi a comparação entre as empresas com o nível de integração

tecnológica acima de média (as mais focadas em sistema - *System-Focused Organizations*), contra as com o integração tecnológica abaixo da média. A principal diferença entre esses dois grupos de empresas não está na identificação de problemas antes da definição de conceito, mas na eficácia da solução. As empresas focadas em sistema conseguem resolver uma proporção maior de problemas antes da definição do conceito.

Moorman e Miner (1998) estudaram a improvisação em desenvolvimento de produtos. Em geral, a atividade de planejamento ocorre primeiro e só depois de um período de tempo é que ocorre a execução ou implementação. Na improvisação, esse período de tempo converge ao zero, de modo que o planejamento<sup>17</sup> e a execução ocorrem quase simultaneamente. Duas empresas participaram da pesquisa e ambas já instituíram processos formalizados de desenvolvimento de produto. Moorman e Miner estudaram um projeto de desenvolvimento de produto por empresa. As duas pesquisadoras participaram de quase todas as reuniões semanais das equipes de projeto durante um período de nove meses. Elas determinaram os eventos/ações e julgaram se eram improvisações ou não. Os resultados mostram que quase 50% dos eventos/ações são improvisações<sup>18</sup>, e, quanto mais turbulento é o ambiente, mais improvisações ocorrem. Pode-se concluir que a improvisação é uma consequência da ocorrência de eventos que não foram previstos, e que, no julgamento da equipe de projeto, poderiam afetar significativamente o desempenho do processo em questão, caso nenhuma ação fosse tomada.

### 2.3.2 – Pesquisas sobre Sistemas de Desenvolvimento de Produtos

O objeto de pesquisas empíricas desse grupo geralmente é o projeto ou o sistema de desenvolvimento de produtos. A atividade de teste não é o foco dessas pesquisas. Entretanto, como esses estudos tratam de projeto ou sistema de desenvolvimento, o papel das atividades de testes pode ser mais bem entendido e contextualizado.

O trabalho de Eisenhardt e Tabrizi (1995) procura comparar duas estratégias para acelerar o desenvolvimento de produtos. A estratégia de compressão (*compression strategy*) assume que o processo de desenvolvimento de produtos é um conjunto previsível de atividades que podem ser comprimidas. A aceleração do desenvolvimento envolve um melhor planejamento dessas atividades; um esforço de redução do tempo requerido para executar cada uma das atividades (por exemplo, envolvendo o fornecedor mais cedo no projeto); uma

---

<sup>17</sup> A literatura de pesquisa sobre a improvisação usa o termo composição em vez de planejamento, isto tem a ver com os estudos sobre a improvisação dos músicos.

<sup>18</sup> O nível de improvisação é medido de 1 até 7 (totalmente improvisado), e, dos 107 eventos, 47% tem nível de 5 ou mais.

superposição dessas atividades; e incentivos adequados para os projetistas acelerarem seus passos (engenharia simultânea).

A outra estratégia é a experiential (*experiential strategy*), que assume o desenvolvimento de produtos como um empreendimento envolvendo muitas incertezas tecnológicas e mercadológicas. Para acelerar o desenvolvimento nesse cenário nebuloso, é necessário fomentar a intuição e trabalhar com as opções flexíveis, as quais, juntas, permitirão que se navegue num ambiente mutante. Entretanto, para evitar problemas de comunicação e reforçar a confiança da equipe, uma estruturação mínima de gestão é necessária para direcionar o esforço de desenvolvimento. Essa estruturação envolve interações mais freqüentes, entre os participantes do *design*, através de ciclos de projetar, construir e testar protótipos de diferentes tipos.

Na parte empírica, Eisenhardt e Tabrizi trabalharam com 72 projetos de desenvolvimento de fabricantes de computadores. Os resultados da análise mostram que as empresas que utilizam a estratégia experiential tiveram mais sucesso em acelerar os projetos de desenvolvimento. A estratégia de compressão teve sucesso somente em acelerar os projetos em segmentos da indústria mais maduros. Isto é, quando o ambiente é menos turbulento, a estratégia de compressão pode ajudar a empresa a acelerar o projeto. Em ambientes com muitas incertezas, a melhor estratégia, de acordo com Eisenhardt e Tabrizi (1995), é trabalhar com várias opções em paralelo, testar freqüentemente, ter um líder forte e uma equipe multifuncional.

Ward e seus colegas da Universidade de Michigan analisaram comparativamente os sistemas de desenvolvimento de produtos da Toyota e Chrysler (Ward, Liker, Cristiano e Sobek, 1995; Sobek, 1997). O resultado é o que eles chamam de “segundo paradoxo da Toyota”. Para esses pesquisadores, o primeiro paradoxo da Toyota é o sistema de produção *Just-in-Time* (JIT). Essa pesquisa comparativa descobriu que a Toyota utiliza um processo de desenvolvimento relativamente pouco estruturado; as suas equipes multidisciplinares não são colocadas e nem tem dedicação exclusiva. Adicionalmente, ao contrário à prática comum de congelar as especificações o mais cedo possível, os engenheiros e gerentes da Toyota procuram adiar as decisões e encaminham, aos seus fornecedores, as especificações finais, muito tarde no processo. Enquanto a engenharia simultânea convencional procura reduzir o número de protótipos, os fornecedores da Toyota procuram multiplicar os protótipos, em alguns casos, de uma forma aparentemente absurda. Entretanto, os indicadores de desempenho da Toyota mostram um sistema de desenvolvimento eficiente e eficaz. Eis o paradoxo.

Esse sistema de desenvolvimento da Toyota foi denominado de engenharia simultânea de conjunto (*set-based concurrent engineering*). O conceito da engenharia simultânea de conjunto foi desenvolvido por Ward e Seering<sup>19</sup> para automatizar o processo de desenvolvimento. Nessa abordagem, os projetistas explicitamente comunicam e pensam sobre os conjuntos de alternativas de *design* nos diferentes níveis de projeto, tais como geração de conceitos e detalhamento de subsistemas. Essas alternativas são desenvolvidas em paralelo. Eles gradualmente reduzem os tamanhos desses conjuntos através de eliminação de alternativas inferiores até chegar a uma solução final. Essa abordagem difere da prática comum de iteração no projeto – realizar modificações ou melhorias em série até que uma solução satisfatória emerge.

Engenharia simultânea de conjunto é um esforço deliberado de definir, comunicar e explorar conjuntos de possíveis soluções em lugar de modificar uma solução pontual. Essa abordagem geralmente resulta em investir (desenvolvendo, testando e avaliando) em várias alternativas de soluções em paralelo e a decisão de seleção é adiada pelo maior tempo possível. Em alguns casos, esses conjuntos podem ser deliberadamente mais limitados que as práticas usuais da indústria. A Toyota utiliza os *check-lists* de engenharia ou os “livros de lições aprendidas” para representar os conjuntos de *designs* manufaturáveis que limitam a liberdade dos estilistas de carro. Em outros casos, as limitações são poucas, por exemplo, no projeto de um carro novo, como o Lexus original.

A engenharia simultânea convencional é chamada, por esses autores, de engenharia simultânea ponto a ponto (*point based concurrent engineering*). Essa abordagem gera inicialmente alternativas de soluções para um problema, depois de uma análise rápida, ponderando os custos e benefícios, e usando o julgamento do projetista, somente a melhor solução é escolhida e desenvolvida. Essa solução é encaminhada para outras áreas funcionais, para que façam críticas e sugestões. Modificações são realizadas para corrigir erros e melhorar o desempenho, através desse processo iterativo, até que uma solução satisfatória emerge. Caso a solução torne-se inviável, todo o procedimento se repete. Esse processo iterativo é chamado de ponto a ponto (*point to point*), pois o projeto move-se de um ponto a outro no espaço de design. Problema com essa abordagem aparece quando uma solução é enviada para a crítica de outros componentes da equipe. Cada modificação gera mais modificações e análises, e demanda mais comunicações. Teoricamente, não há garantia de que esse processo convirja.

---

<sup>19</sup> A. Ward e W. Seering, “*Quantitative Inference in a Mechanical Design Compiler*” (Montreal: Proceedings of the First International ASME Conference on *Design Theory and Methodology*, setembro 1989), pp. 89-97. apud Ward et. al. (1995).

O resultado dessa linha de pesquisa do grupo da Universidade de Michigan, mostra que o processo de desenvolvimento de produtos da Toyota é extremamente eficiente: o evento “aprovação do conceito do novo carro”, que sinaliza o início formal do programa de desenvolvimento de um carro novo, ocorre 27 meses antes do início da produção. Esse tempo é de 29 meses para a Nissan e de 37 meses para o modelo LH, da Chrysler. O processo da Toyota requer 50% menos homens/ano que o LH da Chrysler. Fluxograma nas paredes e manuais espessos são marcas registradas nos processos de desenvolvimento, nos EUA. Na Toyota, esses documentos são reduzidos a poucas páginas. A Toyota estabelece *milestones* rígidos, e, desde que cada grupo de projetistas (incluindo os fornecedores) cumpra os prazos e os requisitos, a montadora não se preocupa com o monitoramento da evolução de cada um. Os fornecedores da Toyota gastam menos tempo comunicando-se com a montadora do que os fornecedores americanos com seus clientes. Isso se deve, provavelmente, à relação duradoura estabelecida há anos entre as partes.

O livro do Iansiti (1998), parte dele discutida na seção anterior, foca as decisões de seleção de tecnologias na etapa de definição do projeto e mostra, através de vários estudos empíricos, como essas decisões são chaves para melhorar o desempenho do projeto e do produto final. Iansiti argumenta que, por causa da dinâmica e da complexidade típicas de um ambiente tecnológico de alta velocidade, essas decisões são os principais desafios para os gestores de projetos de desenvolvimento. O livro também aponta que a decisão tecnológica é um componente essencial das atividades de desenvolvimento de conceitos, num projeto de P&D. A condição que determina a qualidade dessas decisões de seleção, segundo Iansiti, é o que ele denomina de integração de tecnologia, já definida anteriormente. Uma maior integração tecnológica significa maior interligação entre os domínios de conhecimentos fundamentais e, destes, com o conhecimento sobre o contexto de aplicação, na hora de tomada de decisões sobre as tecnologias de produto.

É importante relembrar os diferentes conceitos de conhecimento utilizados por Iansiti: (1) Conhecimento de um domínio específico - São conhecimentos auto-contidos de disciplinas fundamentais (por exemplo, física de semicondutores) e independem do contexto imediato do produto. Esses conhecimentos são relativamente fáceis de se articular e generalizar; e (2) Conhecimento específico do contexto ou do sistema - Parte de conhecimento requerido para realizar P&D é o conhecimento integrativo ou sistêmico que descreve as interações entre os domínios e o contexto de aplicação. A operação de uma planta industrial pode ser tão complexa que somente uma parte dessas informações é contida num manual. Esse conhecimento é difícil de ser articulado e geralmente permanece na forma tácita.

Como a integração tecnológica requer conhecimentos, Iansiti argumenta que os procedimentos chaves de um processo eficaz de integração tecnológica são: geração de conhecimento, retenção de conhecimento, e aplicação de conhecimento. Ele afirma que a “experimentação é a essência da geração de conhecimento” (Iansiti, 1998, p. 22). A experimentação torna-se mais importante quando o desenvolvimento envolve a novidade e a complexidade, tanto em tecnologia como em mercado. A tática de experimentação depende das características da base de conhecimento (Pisano, 1997)<sup>20</sup>. Adicionalmente, quanto menos explícito é o conhecimento, maior será a utilidade da experimentação.

O trabalho empírico de Iansiti examina a relação entre o processo de gestão do projeto (incluindo a integração tecnológica), utilizado pela organização, e o desempenho do projeto. O levantamento de dados foi realizado em todas as empresas fabricantes de *mainframe*. No total, 27 projetos de desenvolvimento de módulos de processamento de *mainframe* foram estudados. O autor repetiu a metodologia para os projetos de semicondutores e de estações de trabalho. No total, mais de cem projetos foram analisados. Os resultados obtidos por Iansiti mostram que os projetos com valores altos de integração tecnológica<sup>21</sup> geralmente têm melhores desempenhos de projeto. Isto é, maior integração tecnológica, menor *lead time*, e menor emprego de recursos humanos em projeto.

### 2.3.3 – Pesquisas sobre Estratégias de Testes em Desenvolvimento de Produtos

As pesquisas empíricas aqui revisadas procuram identificar os fatores relevantes que influenciam a prática de testes em processo de desenvolvimento de produtos. Esses fatores incluem: o conhecimento sobre as condições reais de operação (von Hippel e Tyre, 1995); o nível de conhecimento técnico (Pisano, 1997); a tecnologia de processo de desenvolvimento de produtos (Thomke, von Hippel e Frank, 1998); e a tecnologia do produto (Thomke 1997, Thomke e Reinstern, 1998, e Thomke, 1998). Lynn, Mazzuca, Marone e Paulson (1998) e Lynn, Morone e Paulson (1996) mostraram que inovações radicais exigem a prática de tentativas e erros, de longa duração, em condições reais de mercado. Apesar de essas pesquisas serem bem recentes, em conjunto, elas constituem uma base inicial bastante sólida para fazer entender o papel do teste em desenvolvimento de produtos. Uma descrição sucinta dessas pesquisas é apresentada a seguir. O objetivo principal é destacar a base conceitual dessas pesquisas e melhor entender os resultados obtidos.

---

<sup>20</sup> A pesquisa do Pisano é revisada ainda neste capítulo.

<sup>21</sup> Iansiti desenvolveu uma medida quantitativa de integração tecnológica que inclui indicadores de geração, retenção e aplicação de conhecimentos.

Os pesquisadores von Hippel e Tyre (1995) mostram que uma parte significativa dos problemas, na operação real de novos produtos, é criada depois de lançamento comercial. Eles concluíram que estes problemas não são passíveis de previsão por projetistas. Isso implica que o esforço de desenvolvimento não deve terminar, uma vez o produto lançado no mercado. Eles analisaram, retrospectivamente, a operação inicial, no campo, de dois novos equipamentos de processo. Ambos os equipamentos iniciaram a operação há cerca de dois anos. Os usuários encontraram vários problemas no campo. Esses problemas operacionais são objeto do estudo.

Foram identificados 27 problemas, e 22 (81%) deles foram identificados pelos usuários (nas fábricas). Os cinco problemas restantes foram identificados pelos projetistas, antes de introduzirem os equipamentos nas fábricas, mas, por uma razão ou outra (por exemplo, por falta de tempo), não foram resolvidos antes de implantação. Sete dos 22 foram problemas criados pelos usuários, quando eles decidiram usar os equipamentos para fins que estão fora da especificação original. Não há diferenças significativas na distribuição desses problemas nos dois equipamentos. Uma conclusão importante desses resultados é que a identificação de problemas é associada intimamente com a experiência na operação de equipamentos. Os autores concluem adicionalmente que o esforço de identificação de problemas, durante o desenvolvimento, depende da relação custo/benefício esperado pelo projetista. Se o custo de sanar o problema identificado, depois do lançamento, for alto, o projetista investirá mais na identificação de problemas, realizando mais testes durante o desenvolvimento. Esse resultado empírico de von Hippel e Tyre corrobora a afirmação do Habermeier (1990) de que existem dificuldades insuperáveis para aprender, sobre a tecnologia ou o produto, através de estudos teóricos e experimentos laboratoriais. As fontes dessas dificuldades são a complexidade do sistema e suas interações, e a existência de lacunas de conhecimento.

No modelo de desenvolvimento de processo de produção de Pisano (1997)<sup>22</sup>, o projetista inicia o projeto com um conjunto de metas de desempenho do processo. Essas metas podem ser: custo unitário, capacidade requerida, rendimento (*yield*), nível de qualidade, tolerâncias críticas ou outras características operacionais. Para simplificar a exposição, Pisano utilizou os seguintes símbolos:

---

<sup>22</sup> Pisano estudou o desenvolvimento de processo produtivo na indústria farmacêutica. entretanto, a conceituação empregada por ele se aplica perfeitamente para o desenvolvimento de produto.

$X_c$  = Condições reais (comerciais) de operação do processo;

$C$  = Características de desempenho do processo sob condições comerciais ( $X_c$ );

$P$  = Parâmetros do processo cujos valores determinam o desempenho  $C$ .

O problema do projetista é então determinar  $p^*$  que otimize  $C$  dada  $X_c$ :  $C(p^*|X_c)$ , ou atingir um nível satisfatório de  $C$ . Adicionalmente, num contexto competitivo, essa otimização tem que ser realizada de uma forma eficiente e rápida. A procura por um  $p^*$  é um processo típico de resolução de problemas técnicos. O processo de resolução geralmente é interativo, envolvendo ciclos de busca e seleção de alternativas. Em cada ciclo, a diferença entre o desejado e o atual tende a se reduzir progressivamente.

Pisano afirma que no coração desse processo de aprendizagem residem os experimentos, tanto conceituais como físicos, que fornecem um *feedback* sobre as tentativas de redução da diferença de desempenho. Os experimentos podem ser realizados em muitas formas. A imagem tradicional de um experimento é geralmente o teste de protótipos ou a análise laboratorial de amostras, mas os avanços em tecnologia permitiram que os projetos de produtos e processos possam ser testados e analisados utilizando a simulação computacional. Uma maneira de distinguir as diferentes formas de experimentação é o grau pelo qual o experimento é fiel (*representativeness*) às condições finais de uso.

Quando um conjunto de parâmetros,  $p$ , é testado no “laboratório”, que pode ser uma simulação digital ou uma produção piloto, as condições de teste são representadas por  $X_l$ , que geralmente difere significativamente de  $X_c$ . Nessa situação, o projetista não observa  $C(p)$ ; mas sim o desempenho do projeto dentro do laboratório:  $L(p|X_l)$ . Experimentos laboratoriais podem ser tratados como uma representação das condições reais de operação futura. As diferenças entre  $L(p|X_l)$  e  $C(p|X_c)$  podem redundar na falta de fidelidade dos resultados dos experimentos. O maior desafio do desenvolvimento é prever  $C(p|X_c)$  baseado em  $L(p|X_l)$ <sup>23</sup>.

A capacidade em realizar essa previsão depende do nível de conhecimento do projetista, segundo Pisano, e o nível de conhecimento é a extensão pela qual a relação causa/efeito é claramente identificada e bem entendida. Para fins desta discussão sobre o desenvolvimento de processo, a relação causa/efeito refere-se aos efeitos das condições de experimento nos resultados experimentais. Com um melhor conhecimento sobre essas relações causa/efeito, o projetista pode construir modelos mais precisos e completos que

---

<sup>23</sup> Sem considerar a existência de distorções de medição causadas pela calibração de instrumentos e outros fatores dentro do laboratório.

prevêem o desempenho futuro (sob condições específicas) a partir de dados laboratoriais.

Para processos (ou produtos) razoavelmente complexos, um conhecimento completo seria difícil de obter. Mas, a partir da experiência acumulada, o projetista pode desenvolver uma heurística para prever o desempenho futuro com os resultados laboratoriais. Nesse caso, o projetista pode não entender como uma condição específica afeta o processo ou o produto, mas conta com uma regra que relaciona as condições laboratoriais com os desempenhos do processo ou produto em condições reais.

Em qualquer contexto tecnológico, as oportunidades de realizar testes “laboratoriais”<sup>24</sup> devem depender da extensão de conhecimento sobre as relações causa/efeito acumulada pela teoria científica ou experiência prática. Quando esse conhecimento é extenso, a tática é utilizar mais intensamente testes laboratoriais que fornecem previsões razoavelmente precisas sobre o desempenho comercial do processo. Nessas condições, os testes em condições laboratoriais podem ter um papel importante no desenvolvimento.

Por outro lado, em tecnologias nas quais os conhecimentos teóricos e práticos sobre escala e os resultados de experimentos são limitados, seria muito difícil de prever o desempenho comercial a partir de resultados laboratoriais. Nessas condições, os testes do processo tem que ser realizados em condições o mais próximo possível das operacionais reais.

A partir dessa discussão conceitual, Pisano realizou um estudo empírico em que ele comparou duas rotas tecnológicas distintas para desenvolver o mesmo tipo de produtos: os medicamentos. Como a indústria farmacêutica, em nível mundial, conhece muito mais sobre uma rota que a outra, Pisano procurou verificar se essa diferença em conhecimento afetaria a estratégia de testes numa amostra de projetos de desenvolvimento de medicamentos. Uma descrição sumária dessas duas rotas, é apresentada a seguir, antes de mostrar os principais resultados dessa pesquisa.

Rota de síntese química - Através de quase 200 anos de desenvolvimento e experiências de *scale-up*, um grande conjunto de heurísticas de engenharia química foi acumulado e ainda é largamente utilizado para orientar a seleção de processo, *scale-up* e projeto de plantas. Atualmente, uma boa parte desses conhecimentos sobre a síntese química é codificada em modelos computacionais que permitem simulações de processos para identificar os impactos no desempenho em virtude de mudanças nos parâmetros do processo.

Rota de biotecnologia - A base de conhecimento sobre os processos bioquímicos é bem diferente da dos químicos. Essa diferença deve-se principalmente ao estágio de

---

<sup>24</sup> Pisano chama isto de *learning-before-doing*.

maturidade distinto dessas tecnologias. Comparada à síntese química, a biotecnologia está na sua infância. A principal descoberta que deslanchou a corrida para desenvolver produtos farmacêuticos via biotecnologia ocorreu em 1973. As pesquisas básicas para entender os problemas de operar processos biológicos de grande escala ainda são incipientes, se comparadas com a química convencional.

As principais diferenças entre a química convencional e a biotecnologia são três: (1) Conhecimento teórico - Os fatores que afetam o processo biotecnológico, mesmo na escala laboratorial, não são conhecidos. Isso torna a previsão de desempenho do processo, a partir de uma mudança das condições operacionais, difícil. (2) Dificuldades em caracterizar produtos intermediários e finais - As moléculas produzidas pela biotecnologia têm estruturas muito mais complexas, se comparadas com os resultados do processo químico. Os pesquisadores de biotecnologia ainda não podem isolar e analisar cada reação do processo, pois cada processo pode envolver literalmente milhares de reações dentro das células. (3) Falta de conhecimento sobre os efeitos secundários de *scale-up* - Ainda inexistem heurísticas genéricas que se aplicam a um conjunto maior de processos biotecnológicos, conseqüentemente, a previsão do desempenho do processo, a partir de resultados laboratoriais, envolve muita incerteza.

No estudo de Pisano, 23 projetos de desenvolvimento foram incluídos, sendo 13 de processos tradicionais (síntese química). A variável dependente é o custo de desenvolvimento, que é medido como o total de horas de cientistas e engenheiros dedicadas a P&D, *scale-up*, e transferência para a planta comercial. A principal variável independente é um índice denominado de Transfer, definida pela relação:

**Transfer = lead time até a transferência para a planta comercial / lead time total do desenvolvimento.**

Um valor menor de Transfer significa que o desenvolvimento é transferido mais cedo para a planta comercial. Isso deve ocorrer com tecnologias nas quais o nível de conhecimento acumulado é menor. Os resultados obtidos por Pisano confirmam essa hipótese. O valor médio do Transfer dos projetos que utilizam a rota biotecnológica é 0,57 e o dos projetos de síntese química é quase 0,80. Em outros termos, os projetos de síntese química gastam mais tempo desenvolvendo produtos em laboratório e planta piloto que os da rota biotecnológica.

A pesquisa de Thomke, von Hippel e Frank (1998) também foca no desenvolvimento de produtos na indústria farmacêutica. O artigo explora a natureza do processo de tentativas e erros em resolução de problemas em P&D e os potenciais impactos de novas tecnologias de

descobrimto de medicamentos, dentro da rota de síntese química, em desempenho de desenvolvimento de produtos. Antes de apresentar a pesquisa propriamente dita, faz-se necessária uma breve explicação sobre as tecnologias de descobrimto de drogas.

São duas as abordagens básicas de descobrimto de medicamentos: (1) Testar muitas moléculas até encontrar uma que combina com o receptor alvo, sem conhecer, a priori, a estrutura molecular do receptor; e (2) Identificar a estrutura molecular do receptor alvo e tentar projetar ou selecionar uma molécula que combina com o receptor.

Até a década de 1970, por causa da limitação técnica, somente a primeira abordagem era viável. Isso era, e ainda é, feito através de um procedimento sistemático de tentativa e erro chamado de "triagem em massa" (*mass screening*). O procedimento tem início com a seleção de um *screen*, por exemplo, uma bactéria causadora da doença, e, depois, muitas moléculas candidatas são testadas contra o *screen*. Essas moléculas podem ser retiradas de um banco de moléculas ou selecionadas a partir de substâncias naturais. Nesse último caso, o processo de síntese dos chamados análogos, leva, na média, de sete a dez dias e custa US\$ 7.500. Para cada medicamento que foi introduzido no mercado, a empresa precisa, na média, sintetizar 6.100 análogos. Isto representa um investimento de US\$ 46 milhões e 170 homens/ano só para obter os análogos.

Avanços em conhecimento sobre química, biologia e origens moleculares de doenças permitiram a determinação de estrutura de proteínas e a modelagem molecular. Essas tecnologias viabilizaram o desenvolvimento de uma nova metodologia de descobrimto de medicamentos: o projeto racional de medicamentos. Os pesquisadores, que utilizam essa nova abordagem, começam com o uso de técnicas como a cristalografia de raios X e/ou a espectroscopia com ressonância magnética nuclear, para determinar a forma tridimensional de receptor ou enzima que eles querem influenciar com um medicamento. Empregando *softwares* especializados, os pesquisadores projetam e testam moléculas, simulando, no computador, as que melhor se "encaixam" no receptor alvo. Depois, moléculas reais são criadas em laboratório, de acordo com as especificações determinadas pelas simulações computacionais.

Entretanto, essa abordagem racional enfrenta ainda alguns problemas. Primeiro, a precisão requerida da estrutura de receptores não é fácil de ser obtida com a tecnologia atual. Segundo, a forma do receptor pode se alterar drasticamente quando um medicamento é introduzido. Essa mudança da forma torna o *design* de molécula extremamente complexo. Conseqüentemente, os pesquisadores recorrem à abordagem tradicional para criar e testar análogos de medicamento criado pela abordagem racional. Nos últimos anos, surgiu uma

nova solução, chamada de química combinatória, que permite uma síntese de substâncias e análogos muito mais rápida e barata. Essa abordagem é baseada em novas estratégias de sínteses e automação de equipamentos. Como consequência, o custo de síntese de uma substância caiu de US\$ 7.500, via abordagem tradicional, para um valor numa faixa de US\$ 1 a US\$ 10. A síntese tradicional demorava de sete a dez dias e, com o novo método, um técnico de laboratório pode criar milhares de análogos em poucos dias. Usando essa abordagem, a precisão requerida sobre a estrutura molecular do receptor pode ser reduzida, pois a química combinatória pode ser empregada para criar milhares de substâncias que podem se “encaixar” num receptor.

No estudo empírico, Thomke, von Hippel e Frank selecionaram um projeto de desenvolvimento que busca a identificação de um medicamento para glaucoma, e comparam os custos e resultados alcançados com o emprego da química combinatória com os custos e resultados estimados, por especialistas, se o método tradicional fosse utilizado. Os principais resultados obtidos estão na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1 – Comparação entre Química Combinatória e Método Tradicional**

Variável do projeto	Química combinatória	Método tradicional
Prazo de desenvolvimento	3,5 meses	5 anos
Químicos requeridos	4	15
Nº substâncias testadas	~ 9.000	~ 3.750
Nº de ciclos	1	100 (máx. 250)
Nº de substâncias / ciclo	~ 9000	~ 38
Custo de triagem / ciclo	US\$ 10.000	US\$ 10.000
Custo de mão-de-obra total	US\$ 167.000	US\$ 19 milhões
Custo total / substância	US\$ 19	US\$ 5.000

Esses resultados mostram o melhoramento em todos os parâmetros de desempenho, com a adoção da nova tecnologia de desenvolvimento. Alguns desses parâmetros tiveram alterações radicais, por exemplo, o prazo de desenvolvimento passou de cinco anos para três a cinco meses. Os entrevistados acreditam que o custo e o tempo requeridos pelo método tradicional provavelmente inviabilizaria o seu uso pela empresa. Adicionalmente, o método

tradicional tem uma chance bem menor de achar uma substância promissora para tratar o glaucoma. Por outro lado, a química combinatória ainda tem seus limites. Atualmente, ela não é eficaz para lidar com moléculas mais complexas.

Os trabalhos de Thomke (1997), Thomke e Reinstern (1998) e Thomke (1998) mostram como a estratégia de testes é afetada pelo custo de modificação dos protótipos reais. Os três trabalhos baseiam-se numa mesma pesquisa de campo, sobre desenvolvimento de circuitos integrados (CI), envolvendo 1.000 projetistas de CI.

Os autores introduziram o conceito de flexibilidade para estudar o impacto de custos de testes. De acordo com Thomke e Reinstern (1998), “a flexibilidade de desenvolvimento pode ser definida em função do custo econômico incremental de modificar um produto como uma resposta às demandas que poderão ter origens externas (e.g., alteração das necessidades de clientes) ou internas (e.g., a descoberta de uma melhor solução técnica) ao processo de desenvolvimento. A flexibilidade de desenvolvimento seria menor se o custo econômico de modificar um produto fosse maior”. Uma alteração no projeto de desenvolvimento deve ser realizada quando o custo econômico da alteração é menor que o benefício econômico da mesma. Se a flexibilidade for menor, os projetistas são mais propensos a realizar atividades custosas e demoradas de coleta e análise de dados objetivando minimizar os riscos de alterações do projeto. Para verificar essa suposição, os autores selecionaram duas tecnologias de projeto de circuitos integrados, com níveis de flexibilidade muito diferentes: (1) EPLD (*electrically-programmable logic device*); e (2) Asic (*application-specific integrated circuit*).

Os protótipos de EPLD são, geralmente, muito baratos (poucas centenas de dólares) e podem ser “apagados” e reprogramados quando necessário. O custo de construir e modificar um protótipo de Asic pode exceder facilmente dezenas de milhares de dólares, por causa dos custos fixos de manufatura. O *lead time* de um protótipo de Asic tipicamente excede uma semana e o protótipo de EPLD pode ser produzido (programado) quase instantaneamente. Essa diferença é relevante para uma indústria de alta tecnologia e de alta velocidade na qual o *time-to-market* é fator crítico para o sucesso do projeto. De acordo com a definição de flexibilidade citada, pode-se concluir que a tecnologia EPLD é mais flexível que a Asic, em desenvolvimento de produtos.

O processo de desenvolvimento de CI envolve duas etapas principais: a primeira etapa utiliza as ferramentas de CAD e CAE para determinar e testar as especificações do CI; e a segunda etapa constrói e testa os protótipos reais. Como o custo e o prazo de modificar os protótipos Asic são grandes, espera-se que os projetistas de Asic dediquem mais esforço e tempo na primeira etapa para evitar os altos custos de modificação da segunda etapa. No caso

de desenvolvimento de EPLD, como o custo e o prazo para modificar o protótipo são baixos, espera-se que os projetistas gastem menos tempo e esforço na simulação para eliminar os problemas de projeto.

Thomke e Reinstern analisaram 391 projetos de desenvolvimento de CI. Os resultados mostram que: (1) Os projetistas de Asics gastam mais tempo em simulação antes de construir protótipos físicos; (2) Comparando o número médio de interações com os protótipos<sup>25</sup>, os projetistas de EPLD realmente interagem mais com o protótipo: 14 interações por projeto EPLD, contra menos de duas interações em Asic; e (3) Os projetos EPLD alocam, proporcionalmente, mais homens/mês para a segunda etapa que os de Asic.

Os Asics são projetados com mais cuidado, para reduzir as chances de serem encontrados problemas durante os testes de protótipos, isto é, os projetistas dedicam mais esforço em detalhar e analisar o *design* antes de se comprometer com o projeto ou antes de construir o primeiro protótipo. No projeto de EPLD, como o custo de retrabalho é muito baixo, os projetistas pouco se esforçam em detalhar o *design* e passam a construir o protótipo logo no início do processo de *design*. Eles utilizam os protótipos para identificar os erros e modificar o projeto de acordo.

Os trabalhos de Thomke e Reinstern demonstram empiricamente que, quando o custo de implantação, neste caso seria o custo de construir o protótipo do CI, é muito alto (baixo), o projetista procura investir mais (menos) esforço em planejamento/análise antes de executar (montar o protótipo). No caso em que o custo de implantação é baixo (caso do EPLD), o projetista adota a estratégia de *learning by doing*, i.e., construir logo o protótipo e utilizá-lo para identificar os problemas e realizar as devidas correções.

A Tabela 2.2 localiza<sup>26</sup> as tecnologias estudadas em pesquisas de Pisano (1997) e de Thomke e Reinstern (1998) de acordo com as dimensões nível de conhecimento e custo de modificação de protótipos.

Lynn, Mazzuca, Marone e Paulson (1998) e Lynn, Morone e Paulson (1996) apresentaram um estudo de quatro inovações radicais de sucesso: o adoçante NutraSweet, a fibra ótica da Corning, o telefone celular da Motorola e a tomografia da GE. Por serem radicais, essas inovações enfrentavam demandas incertas e tecnologias não totalmente comprovadas. Os autores concluíram que todas essas empresas empregaram a estratégia baseada em aprendizagem (*learning-driven strategy*) em que as ações não são predeterminadas e são tomadas de acordo com os resultados observados de medidas tomadas

<sup>25</sup> Uma interação ocorre quando o projetista realiza uma mudança física do protótipo e subsequente executa testes para verificar o resultado da modificação.

<sup>26</sup> A localização das tecnologias é baseada no julgamento do autor desta pesquisa.

anteriormente. No caso de tomografia da GE, os fracassos iniciais permitiram que os técnicos apreciassem o potencial da tecnologia da GE e, com a persistência, no quarto lançamento, conseguiram um melhoramento expressivo de mais de dez vezes, em termos de velocidade de varredura e da resolução da imagem. Os autores concluíram que o aprendizado envolve a identificação de áreas que devem ser melhoradas através de desenvolvimento tecnológico; como realizar o *scale-up* do processo produtivo; quais segmentos do mercado são mais receptivos a que aspectos da inovação; e sobre os impactos de outros fatores, como as mudanças na regulamentação governamental. Esse processo pode ser sintetizado pelo ciclo de “adaptar, improvisar e superar” (*adapt, improvise and overcome*) que não é muito diferente do método tentativas e erros.

**Tabela 2.2 – Nível de Conhecimento e Custo de Modificação**

		Nível de conhecimento	
		Baixo ←	→ Alto
Custo de modificação do protótipo	Baixo		EPLD
	Alto	Bioteecnologia	Síntese química

### 2.3.4 – Sínteses e Conclusões das Pesquisas Empíricas

Como uma síntese da revisão dessas pesquisas empíricas, pode-se apontar alguns fatores relevantes e como eles afetam as estratégias de testes durante o desenvolvimento de produtos.

Primeiro, os avanços tecnológicos em aparatos e objetos de testes têm impactos significativos em custo, prazo e confiabilidade de experimentação e, conseqüentemente, exigem uma revisão na estratégia de testes nos projetos de desenvolvimento (Thomke, von Hippel e Frank, 1998). Entretanto, esses avanços ainda não substituem, e, provavelmente, nunca poderão (Habermeier, 1990) substituir completamente a realização de testes com protótipos completos, em condições reais de operação (Lynn, Morone e Paulson, 1996).

Segundo, o grau de conhecimento, tanto tecnológico como mercadológico, é intimamente relacionado com a estratégia de testes. Esse grau de conhecimento pode ser

tratado em, pelo menos, dois níveis distintos. No nível macro, o grau do conhecimento científico-tecnológico, por exemplo, depende da maturidade do setor industrial, como é o caso do estudo de Pisano (1997). O conhecimento acumulado sobre a síntese química é bem maior que o acumulado em biotecnologia, conseqüentemente, as estratégias de testes ou experimentação devem ser diferentes. Esse processo de acumulação de conhecimento envolve um horizonte de tempo bem maior que a duração de um projeto típico de desenvolvimento, portanto, do ponto de vista do gerente de projeto, esse conhecimento pode ser considerado como constante<sup>27</sup>. A preocupação do gerente é garantir que a equipe tenha acesso a esse conhecimento. No nível micro, que é o desenvolvimento de um projeto, o grau de conhecimento, sobre a tecnologia e o mercado em questão, deve crescer ao longo do projeto. Nesse caso, a atualização de conhecimento e a aprendizagem tornam-se fatores imprescindíveis para o sucesso do projeto. É importante, neste nível, distinguir os domínios de conhecimentos (Iansiti, 1998). O domínio de conhecimento contextual é o fator mais importante para melhorar o desempenho do produto como um sistema integrado.

Terceiro, a incerteza, o inesperado e a ambigüidade são características inerentes ao processo de desenvolvimento de produtos. A capacidade de improvisar (Moorman e Miner, 1998), um sistema mais flexível de desenvolvimento, por exemplo, a estratégia experiencial de Eisenhardt e Tabrizi (1995), e o emprego da tática de tentativas e erros são medidas ou condições necessárias para organizar o processo de desenvolvimento. Uma maneira importante de reduzir a incerteza é através de experimentações ou testes. Allen (1966) mostrou que uma maior frequência na obtenção de informações é relacionada com o menor tempo de resolução de problema de projeto. Por outro lado, os testes não representam fielmente as condições reais de operação. Portanto, o uso de testes introduz uma incerteza adicional: a relação entre o resultado do teste com o resultado real.

Quarto, o processo de desenvolvimento de produtos é constituído fundamentalmente de duas tarefas, que se repetem diversas vezes: a busca por soluções e a avaliação das mesmas (Marples, 1961). Portanto, o desenvolvimento de produto é essencialmente um processo de resolução de problemas (Baron, 1994). Essas buscas e avaliações de soluções são realizadas dentro de uma estrutura hierárquica de decisões, iniciando com a definição do sistema, passando pelo subsistema e chegando à escolha de componentes. Iansiti (1998) apontou para a importância de definir o problema antes de se iniciar o processo de busca e avaliação, particularmente no desenvolvimento de um produto complexo. Um problema de componente pode ser resolvido mais eficientemente no nível do subsistema.

---

<sup>27</sup>. Esta afirmação, provavelmente, não seria válida para as áreas de *high tech*.

Finalmente, a literatura empírica mostra que a estratégia de desenvolvimento e, especificamente, a de experimentação e teste, podem ter impactos significativos no desempenho do projeto de desenvolvimento. As decisões estratégicas relatadas incluem a frequência com que os protótipos são testados, a forma e o número de iterações da equipe, o envolvimento de fornecedores, o desenvolvimento paralelo ou sequencial de alternativas, quando congelar o conceito do projeto (o mais cedo possível ou o mais tarde possível), etc. Os resultados empíricos apontam para a superioridade da estratégia de maior frequência de interação e teste (estratégia experiencial) e de desenvolvimento em paralelo (engenharia simultânea de conjunto da Toyota). Essas estratégias são mais flexíveis e toleram melhor as incertezas inerentes ao desenvolvimento. Entretanto, essas pesquisas empíricas, por sua natureza metodológica, encontram dificuldade para fornecer orientações estratégicas para situações diferentes das estudadas.

#### 2.4 – Pesquisas Analíticas sobre Testes em Desenvolvimento de Produtos

Os primeiros estudos analíticos sobre o papel de testes em desempenho de projetos de desenvolvimento datam do final da década de 1950. Esses estudos foram motivados, provavelmente, pelo interesse do Departamento de Defesa (DoD), do governo americano, em melhorar o desempenho dos esforços de P&D militar<sup>28</sup>. Vários autores desses estudos (William Abernathy, Richard Rosenbloom e Richard Nelson são alguns exemplos), se tornaram, mais tarde, bem conhecidos na comunidade acadêmica que trabalha com a gestão de tecnologia.

As pesquisas empíricas também desenvolvem modelos matemáticos com o objetivo de orientar e estruturar os trabalhos de campo, entretanto, não procuram determinar uma solução ótima. Alguns exemplos são o modelo de Pisano (1997), discutido na Seção 2.3, para entender as relações entre os testes laboratoriais (imperfeitos) e os testes em planta comercial (reais), e um modelo conceitual do Thomke (1998), que define a eficiência econômica de experimentação e mostra como esta pode afetar o *timing* da adoção de diferentes tecnologias de testes ao longo de um projeto. Entretanto, o enfoque dessa seção está em trabalhos cuja metodologia principal de pesquisa é a modelagem matemática do processo de teste e experimentação.

A literatura de pesquisa analítica que aborda teste em desenvolvimento de produtos pode ser subdividida em vários grupos, de acordo com o tipo de problema do teste

---

<sup>28</sup> Algumas organizações que patrocinaram estes estudos são: the Office of Naval Research e Rand Corporation, todas relacionadas com o DoD (Department of Defense).

pesquisado. Um primeiro grupo trabalha com o problema de determinar o número ótimo de alternativas para serem testadas em paralelo. O segundo grupo trabalha com o problema de determinação da melhor estratégia de testes no desenvolvimento de produtos. As estratégias podem ser de testes em paralelo, em seqüência, ou uma combinação das duas. Finalmente, o terceiro grupo trata do problema de determinação da melhor estratégia para identificação de erros de projeto utilizando testes. Para cada grupo, a revisão da literatura, apresentada a seguir, descreve os problemas de pesquisa, as metodologias empregadas e os principais resultados obtidos nessas pesquisas.

#### 2.4.1 – Estratégia Ótima para Testes em Paralelo

Os trabalhos revisados, do primeiro grupo são os de Nelson (1961), Nelson (1982) e Dahan e Mendelson (2001). O artigo de 1961, de Nelson, procura responder à pergunta: Quantos projetos concorrentes devem ser incluídos num esforço (ou programa) de desenvolvimento paralelo? Esses projetos diferem entre si em termos de custo esperado, desempenho esperado e duração de desenvolvimento esperada. Essas estimativas são sujeitas a erros significativos no momento de decidir quantos projetos devem ser incluídos no programa de desenvolvimento para serem avaliados ou testados. Por outro lado, essas estimativas de custo, desempenho e prazo tendem a melhorar enquanto avança o desenvolvimento e as informações são acumuladas. A inclusão de um número maior de projetos paralelos no programa aumenta a chance de se obter um melhor desempenho do produto final, mas, por outro lado, aumenta o custo do programa de P&D.

Nelson (1982) trata da mesma questão de pesquisa do trabalho de 1961, mas discute mais extensamente o papel do conhecimento na eficiência do esforço de P&D. Supondo que a competência em P&D é relacionada ao grau de conhecimento da equipe de projeto, o autor propõe um modelo simples que formaliza essa relação. O modelo trata a P&D como uma atividade de busca que pode ser realizada com maior ou menor intensidade e em diferentes direções, mas com resultados estocásticos. Nessa perspectiva, a competência em P&D é relacionada com o conhecimento, através da maior eficiência nas atividades de busca. Maior nível de conhecimento permite que o decisor preste atenção somente num subconjunto das alternativas, antes de se engajar na parte custosa do projeto – os estudos e testes caros. Esse subconjunto escolhido para os estudos é, na média, composto de alternativas melhores<sup>29</sup> que o resto do conjunto.

---

<sup>29</sup> “Melhor” em termos de dominância estocástica.

Dahan e Mendelson (2001) estudaram o seguinte problema: quantos conceitos do novo produto devem ser testados em paralelo? “A fase de geração, teste e seleção de conceitos pode ser tratada como a busca de uma solução mais lucrativa para um problema de *design*. Os métodos de geração e teste de idéias nesta fase ‘*fuzzy front end*’ de desenvolvimento de novos produtos fornecem informação para *designers* sobre a preferência de clientes, a viabilidade técnica, e o custo de um novo produto” (Dahan e Mendelson, 2001, p. 102). Para os autores, os testes de conceito envolvem a maioria de métodos empregados para medir os desempenhos de novos produtos e processos. Citaram *voice of customer (VOC)*, análise de usuário de fronteira (*lead user*), *conjoint analysis*, métodos de Kano, e técnica do Pugh para a seleção de conceitos como métodos incluídos na fase de *front end*. Testando um maior número de conceitos, melhora-se a chance de obter um conceito mais lucrativo, mas aumenta-se o custo de desenvolvimento. Comparando a estrutura analítica desse problema de pesquisa, com o de Nelson (1961), percebe-se que são essencialmente idênticos, ambos visam otimizar o número de alternativas a ser testado em paralelo considerando os custos e retornos de teste.

Um modelo genérico, bastante representativo dos desenvolvidos pelos autores acima citados, é caracterizado pelas seguintes suposições:

- Cada alternativa (que pode ser um projeto, uma solução técnica ou um conceito) custa  $C$  para ser desenvolvida e testada;
- O número de alternativas a ser testado é  $N$ ;
- As distribuições de probabilidade de lucro (ou outro parâmetro de desempenho como o custo, o prazo, etc.) das alternativas,  $F(X_i)$ , são idênticas e independentes entre si, em que  $X_i$  é o lucro da alternativa  $i$ , e  $i = 1, \dots, N$ . O valor de  $X_i$  não está incluindo o custo de teste  $C$ .
- Na conclusão de cada teste, o valor de  $X_i$  é observado;
- A alternativa mais lucrativa é escolhida<sup>30</sup>.

Esses modelos supõem que o teste é perfeito, isto é, o resultado de teste mostra o desempenho real (lucro, prazo ou outro parâmetro de desempenho) da alternativa. Em outros termos, as probabilidades de resultados falso positivo e falso negativo são nulas. Outras suposições simplificadoras comuns entre esses modelos são a idêntica distribuição de probabilidade de desempenho para todas as alternativas e a independência probabilística entre

<sup>30</sup> Para ser lançada ou contratada, dependendo do problema de gestão de desenvolvimento específico.

elas. O problema matemático que precisa ser resolvido é determinar a distribuição de probabilidade da melhor alternativa, depois de testar, em paralela, as  $N$  alternativas.

Utilizando técnicas de *order statistics*, Nelson (1982) mostra que, para uma grande variedade de  $F(X_i)$ , o valor esperado dessa distribuição cresce com o aumento do número de alternativas  $N$ . Só que, quando maior for  $N$ , menor será essa taxa de crescimento. Esse resultado permitiu também o cálculo do número ótimo de alternativas ( $N^*$ ) que maximize (se for lucro) ou minimize (geralmente o custo) o valor esperado do desempenho da melhor alternativa. Outro resultado, bastante intuitivo, é sobre a relação entre o custo de realização de teste (por alternativa) e o número ótimo de testes em paralelo  $N^*$ : quanto menor for  $C$ , maior será o valor de  $N^*$  (Nelson, 1961). Com a redução do custo de teste, a melhor prática é aumentar o número de alternativas em testes paralelos.

O modelo de busca simples de Nelson (1982) tem a vantagem de ser suficientemente real para caracterizar, de uma forma plausível, o papel de conhecimento em desenvolvimento, e ainda bastante simples para ser analiticamente manipulável e transparente. Mas, várias suposições simplificadoras são adotadas no modelo. Ciente desse fato, o autor discutiu longamente as possibilidades de aprimorar esse modelo simples, de modo a incluir outros aspectos relevantes que não foram incorporados. Essa discussão literalmente definiu uma agenda de pesquisa para os estudos em estratégia de teste no desenvolvimento de produtos. Alguns tópicos de pesquisa mais relevantes discutidos por Nelson (1982) são: necessidade de incorporar o custo de obter o desempenho técnico do projeto, comparar a estratégia de teste paralela com a seqüencial, e teste de produtos com vários componentes ou subsistemas em que a interação entre eles pode ser complexa.

Dahan e Mendelson (2001) aprimoraram a análise matemática de Nelson (1961 e 1982). Utilizando a teoria de valor extremo (*extreme-value theory*), uma técnica da teoria estatística, eles descobriram que a forma da distribuição de probabilidade de lucro,  $F(X_i)$ , particularmente a do lado direito (de lucro positivo), afeta significativamente a estratégia ótima de teste paralelo de conceitos do novo produto. Para um produto com uma possibilidade, mesmo remota, de ter grande ganho (Dahan e Mendelson denominam de *great upside uncertainty*), a sua curva de distribuição de probabilidade de lucro se estende muito para a direita. Nesse caso, a redução do custo unitário de teste ( $C$ ) resulta em maior número de testes em paralelo (maior valor de  $N^*$ ). Esse resultado coincide com o de Nelson (1961). Entretanto, para produtos com um limite superior de ganho, por causa de menor potencial de mercado, ou impossibilidade de aumentar preço, a sua curva de distribuição não se estende tanto para a direita, se comparada com a do produto de *great upside uncertainty*. Nesse caso,

Dahan e Mendelson (2001) demonstram que a melhor estratégia de teste paralelo é justamente a inversa: a redução do custo unitário do teste ( $C$ ) resulta em menor número de testes em paralelo (menor valor de  $N^*$ ). A explicação, intuitivamente, é: como o potencial de lucro é limitado, o benefício marginal de mais testes é pequeno, portanto, o gasto total (ou o número de alternativas testadas) declina com a redução do custo unitário.

Adicionalmente, Dahan e Mendelson incorporaram o conceito de opção real no modelo – caso o lucro resultante seja negativo, o projetista/decisor poderá abandonar o projeto e, assim, reduzir a perda. A inclusão dessa flexibilidade gerencial, no desenvolvimento de conceitos, resultou em um maior lucro esperado, de acordo com as análises desses autores.

#### 2.4.2 – Estratégia Ótima para Testes em Paralelo e em Seqüência

Os trabalhos revisados nesse segundo grupo de pesquisas analíticas são: Abernathy e Rosenbloom (1968), Weitzman (1979) e Loch, Terwiesch e Thomke (2001).

O trabalho de Abernathy e Rosenbloom (1968) descreve uma estrutura analítica simples que pode ajudar os gerentes a tomar melhores decisões sobre o emprego de estratégia paralela de desenvolvimento. O trabalho é voltado para as decisões tomadas em organizações reais, em vez de tratar a teoria da otimização. Mas os autores reconhecem a extrema dificuldade de estabelecer um procedimento ótimo de seleção com muitas alternativas, num horizonte de  $n$  ciclos de desenvolvimento. Entretanto, eles argumentam que os problemas reais envolvem geralmente um número relativamente pequeno de alternativas e, no máximo, dois ou três ciclos de desenvolvimento. A estrutura analítica é ilustrada através de um projeto de desenvolvimento real, denominado de MCC (módulo da célula de combustível), envolvendo um orçamento de US\$ 1 milhão.

Dois conceitos de MCC foram identificados: MCC operando em temperatura ambiente (TA) e MCC operando em temperatura moderada (TM). Ambos são potencialmente interessantes e os engenheiros têm muitas dúvidas quanto ao desempenho final dos dois. Os estudos preliminares não permitiram uma priorização conclusiva dos dois conceitos, mas já forneceram as seguintes afirmações: a chance de fracasso de cada conceito é 25%; as duas abordagens são independentes, isto é, o resultado de uma não influencia a chance de sucesso da outra; os resultados técnicos podem ser divididos em dois semi-espacos mutuamente exclusivos e coletivamente exaustivos: sucesso e fracasso; as principais incertezas são: custo direto de manufatura (*direct manufacturing cost*) e prazo de desenvolvimento, e a gerência do projeto pode elaborar as duas distribuições de probabilidade para cada conceito.

A gerência precisa, então, decidir sobre a estratégia de desenvolvimento: testar os dois conceitos paralelamente ou em seqüência. Essa decisão requer informações adicionais que foram estimadas: custo de atraso no lançamento (incluindo venda perdida para produtos concorrentes), custo de desenvolvimento para cada estratégia, sensibilidade do volume de venda em relação ao preço, valor da informação da estratégia paralela (a equipe do projeto selecionará a abordagem que obteve o melhor desempenho), etc.

A estrutura analítica do problema de Abernathy e Rosenbloom (1968) pode ser representada por uma árvore de decisão. Na estratégia seqüencial, os autores optaram por desenvolver e testar primeiro a abordagem TM, e a TA só será desenvolvida se a TM fracassar. O modelo foi analisado com o uso de simulação digital e os autores realizaram muitas análises de sensibilidade: testaram diferentes parâmetros para a curva da demanda, custos de desenvolvimento, probabilidade de sucesso, etc.

Weitzman (1979) apresenta uma análise matemática que trata de uma classe bastante comum de problemas de busca (*search*), em economia. Esses problemas são assim caracterizados: Existe um conjunto de oportunidades ou opções de investimento, cada uma tem um retorno incerto. Essa incerteza sobre o retorno pode ser eliminada, pagando um preço, com o uso de teste. A incerteza sobre o retorno de cada oportunidade é representada por uma distribuição de probabilidade. O mesmo pode ocorrer com as incertezas sobre o custo e o tempo requerido de teste. As oportunidades são testadas, seqüencialmente, uma a uma, e a ordem pela qual as oportunidades são testadas é determinada pelo decisor. Quando o decisor resolve interromper a seqüência de testes, a oportunidade testada que apresenta o melhor retorno é selecionada. A pergunta para a qual Weitzman buscou uma solução no trabalho dele é: Qual é a estratégia ótima de busca ou de teste que maximiza o valor presente líquido? A estratégia é definida pela ordem em que as oportunidades são testadas e a regra de decisão, após observar o resultado de cada teste. Em cada ciclo, as opções decisórias são duas: testar a próxima oportunidade ou parar os testes. Esse problema pode ser tratado como um de desenvolvimento de produto. Aliás, o próprio exemplo numérico, no artigo do Weitzman, é um problema de P&D com duas alternativas tecnológicas (A e B). Cada tecnologia é caracterizada por seu valor de investimento, seu prazo de desenvolvimento, e sua distribuição de probabilidade sobre a redução de custo operacional (incerteza sobre retorno). Nesse exemplo, as estratégias de teste são quatro: testar só A; testar só B; testar primeiro A e, dependendo do resultado, testar B; e testar primeiro B e, dependendo do resultado, testar A. Weitzman resolveu essa classe de problemas utilizando a técnica de programação dinâmica. A solução determina a regra de ordenamento das oportunidades e a de parar de executar testes.

O trabalho de Loch, Terwiesch e Thomke (2001), na opinião deste autor, integra e aprimora os avanços obtidos por Abernathy e Rosenbloom (1968) e Weitzman (1979) na análise de estratégias ótimas de teste. Os objetivos da pesquisa deles são: estudar os *drivers* fundamentais de estratégias de testes em paralelo e em seqüência, e desenvolver estratégias ótimas para os gerentes de P&D. Eles desenvolveram modelos de teste que consideram os custos e prazos de teste, o conhecimento prévio, e a aprendizagem entre testes como os *drivers* fundamentais de estratégias de testes.

O primeiro modelo desenvolvido considera que o teste é perfeito. Para definir o conceito de teste perfeito destes pesquisadores, suponha que, no desenvolvimento de um produto, há três alternativas de solução. Com base na experiência e no conhecimento do projetista, ele designa uma probabilidade de sucesso para cada alternativa em questão ( $P_i$ ), mais especificamente,  $P_i$  é a probabilidade da alternativa  $i$  ser a melhor solução, em que  $P_1 + P_2 + P_3 = 1$ , isto é, somente uma das três alternativas é a melhor solução. Para resolver a incerteza, uma das alternativas é testada. Se o teste resolve completamente a incerteza, esse teste é definido como perfeito. Por exemplo, se o resultado do primeiro teste mostra que a alternativa testada,  $i = 1$ , é a melhor, então  $P_1 = 1,0$ , e, conseqüentemente,  $P_2 = 0$  e  $P_3 = 0$ . Esse mecanismo de atualização de informação, modificando a probabilidade de sucesso com a observação do resultado de teste, representa a aprendizagem nos modelos de Loch, Terwiesch e Thomke.

O primeiro modelo trata do seguinte problema de teste:  $N$  alternativas são disponíveis para um projeto e somente uma é a melhor solução. Um teste perfeito é utilizado para identificar essa solução. Em cada ciclo de testes, o projetista precisa decidir quais alternativas devem ser testadas, em paralelo, no ciclo. No ciclo subsequente, o projetista recebe os resultados dos testes anteriores e toma outra decisão sobre quais alternativas restantes devem ser testadas então. O processo repete-se até que a melhor alternativa é identificada. Para tomar essas decisões, as seguintes informações são disponibilizadas ao projetista:  $C$  é o custo fixo por teste;  $t$  é o *lead time* constante entre o início do teste e a observação do resultado de teste;  $Ct$  é o custo de demora por causa do *lead time*  $t$ .

Uma estratégia de teste ótima, para um conjunto de  $N$  alternativas e respectivas probabilidades  $P_i$ , é aquela que minimiza o custo total esperado. A estratégia ótima, derivada por Loch, Terwiesch e Thomke, do primeiro modelo, comporta-se como se espera intuitivamente. Algumas características destas estratégias são:

- Quando o custo de teste,  $C$ , é muito alto, testa-se uma alternativa em cada ciclo; por outro

lado, quando o  $C$  é muito baixo, a melhor estratégia é testar todas  $N$  alternativas no primeiro e único ciclo;

- Se  $Ct$  for muito alto, a melhor estratégia é testar todas as alternativas, em paralelo, no único ciclo, para minimizar o custo de demora.

Comparando o primeiro modelo de Loch, Terwiesch e Thomke (2001) com o do Weitzman (1979), o avanço significativo desse modelo está na formulação do problema de teste. Enquanto o problema de Weitzman testa uma única alternativa em cada ciclo, o primeiro modelo de Loch, Terwiesch e Thomke admite a possibilidade de testar um conjunto variável de alternativas em cada ciclo de experimentos. Em outros termos, esse modelo é mais geral e, portanto, aplica-se a mais situações reais.

Um teste, no mundo real de desenvolvimento de produto, é geralmente realizado com protótipos preliminares (*early prototypes*) e em ambientes simplificados (por exemplo, em laboratórios). Essa situação e outras resultam em testes imperfeitos: O resultado de teste não representa fielmente o desempenho do produto em condições reais. Loch, Terwiesch e Thomke tratam o efeito de testes imperfeitos como uma incerteza residual, sobre o desempenho real do produto, depois de observar os resultados de teste. Esse segundo modelo desenvolvido por Loch, Terwiesch e Thomke tem a mesma estrutura do primeiro, exceto na caracterização do teste: agora é um teste imperfeito.

Para incorporar o teste imperfeito no segundo modelo, parâmetros adicionais são introduzidos<sup>31</sup>, e os principais deles são:

- Resultados de teste, de uma alternativa, são: " $p$ " que significa "a alternativa é mais preferida", ou " $n$ " que significa "a alternativa não é a mais preferida", de acordo com o teste realizado;
- O resultado real de uma alternativa  $i$  pode ser um dos dois possíveis estados: sucesso ( $S_i$ ) ou fracasso ( $F_i$ ). Como somente uma das  $N$  alternativas terá sucesso, a mesma suposição empregada no primeiro modelo, concluiu-se que  $\{S_i | S_j\} = 0$  e  $\{F_i | S_j\} = 1$ ;
- A probabilidade de sucesso da alternativa  $i$  é  $\{S_i\} = P_i$ ;
- Um teste imperfeito é caracterizado pela suas probabilidades de erro:  $\{n_i | S_i\} =$  falso negativo; e  $\{p_i | F_i\} =$  falso positivo. Lembrando que  $\{n_i | S_i\} + \{p_i | S_i\} = 1$  e  $\{p_i | F_i\} + \{n_i | F_i\} = 1$ . Quando  $\{n_i | S_i\} = 0,5$ , o teste não tem poder nenhum de

<sup>31</sup> Os símbolos empregados para representar esses parâmetros são compatíveis com os do Capítulo 3, e não são aqueles utilizados por Loch, Terwiesch e Thomke (2001).

discriminar o estado real. Em outros termos, o teste não é informativo. No outro extremo, quando  $\{n_i | S_i\} = 0$ , o teste é totalmente informativo;

- As probabilidades posteriores:  $\{S_i | n_i\}$ ,  $\{S_j | n_i\}$ ,  $\{S_i | p_i\}$  ou  $\{S_j | p_i\}$ .  $\{S_i | p_i\}$  é a probabilidade de sucesso da alternativa  $i$  dado que o teste da  $i$  deu resultado positivo. Nota-se que  $\{S_i | p_i\}$  e  $\{p_i | S_i\}$  são probabilidades bem distintas. A  $\{S_j | p_i\}$  é a probabilidade de sucesso da alternativa  $j$  dado que o teste da  $i$  deu positivo. Essa probabilidade condicional quantifica a influência do resultado observado de teste da alternativa  $i$  na probabilidade de sucesso da alternativa  $j$ , onde  $j$  não é igual a  $i$ . Essa interferência cruzada é uma novidade introduzida por Loch, Terwiesch e Thomke, no segundo modelo deles.

A inclusão de teste imperfeito torna a estrutura matemática do problema de teste muito mais complexa. Os autores concluíram que a técnica tradicional de programação dinâmica não é capaz de resolver esse problema, pois as probabilidades de transição são dependentes do estado. Eles recorreram à teoria de informação.

### 2.4.3 – Estratégia Ótima para Detecção de Problemas

O objetivo genérico dos modelos revisados nas Seções 2.4.1 e 2.4.2 é identificar uma estratégia ótima de teste que selecione a melhor alternativa de *design*. Entretanto, mesmo que uma alternativa seja selecionada, o seu desenvolvimento até o lançamento pode implicar um esforço permanente de descobrir problemas e resolvê-los através de ciclos adicionais de DBT. Em outros termos, os testes são empregados tanto para comparar as alternativas de *design* como para identificar os problemas ao detalhar o projeto de uma alternativa já selecionada.

Esse esforço de revisão da literatura só encontrou um único artigo de pesquisa, Thomke e Bell (2001), que trata de estratégia ótima de detecção de problemas de *design* aplicando modelos matemáticos. Esse artigo analisa a seguinte situação abstrata de teste: os problemas de um *design* surgem por desconhecimento sobre a expectativa dos clientes e dificuldade em prever o desempenho de uma solução técnica. Os testes ou experimentos são então realizados para identificar esses problemas de *design* de modo que os responsáveis pudessem resolvê-los através de retrabalho. O custo do retrabalho de um mesmo problema é maior se for realizado mais tarde, no desenvolvimento. Isto se explica pelo fato de uma modificação feita num estágio mais tarde do projeto pode exigir retrabalhos em um número maior de componentes ou subsistemas relacionados. Portanto, para reduzir os custos de retrabalho, há o incentivo de se realizar testes o mais cedo possível, durante um projeto. Por

outro lado, o progresso do projeto implica geralmente um acúmulo de problemas de *design*. Como Thomke e Bell assumem que o custo de execução de um teste é fixo, para poder identificar um maior número de problemas com um teste, há então o incentivo de se testar mais tarde, durante o projeto.

Um teste de melhor desempenho é aquele que consegue detectar uma maior porcentagem de problemas de *design* acumulados. Thomke e Bell denominam esse desempenho de teste de fidelidade (*fidelity*). Eles assumem que no final de qualquer projeto realiza-se um teste de fidelidade completa (*full fidelity*) - aquele teste que revela todos os problemas existentes no *design* - que pode ser considerado como um teste no mercado. Os testes de alta fidelidade geralmente custam mais para o projetista, comparados com os de baixa fidelidade.

Para essa situação abstrata de teste, Thomke e Bell (2001) elaboraram vários modelos para tentar responder à seguinte questão: dados os parâmetros de custos e de fidelidade dos testes disponíveis para o projetista, qual deve ser a melhor seqüência e a freqüência de testes num projeto? Os modelos mais simples permitem um único teste adicional além do teste final. Os mais genéricos permitem a realização de  $N$  testes durante um projeto, com fidelidades diferentes, mas supondo sempre que o intervalo de tempo entre dois consecutivos seja constante. A minimização do custo total (soma dos custos de retrabalho e de testes) determina o melhor valor de  $N$  e a seqüência de realização dos testes.

Um detalhe importante no trabalho de Thomke e Bell (2001) é a introdução, nos seus modelos, de três tipos de relação entre os testes realizados em seqüência. O primeiro tipo é a de totalmente superposta (*fully overlapping*), isto é, os problemas detectados no segundo teste incluem todos aqueles já detectados no primeiro teste. Isto pode ocorrer se o segundo for simplesmente uma atualização do primeiro. Nessa relação, a solução ótima do modelo recomenda poucos testes de alta fidelidade. O segundo tipo é a de superposição parcial (*partially overlapping*), na qual somente parte dos problemas detectados do primeiro teste é revelada pelo segundo. Nessa relação, a solução ótima do modelo recomenda muitos testes de baixa fidelidade. Finalmente, o terceiro tipo é a complementar (*complementary*), isto é, os problemas detectados no segundo teste não contêm nenhum do primeiro teste. Isto pode ocorrer se os dois testes avaliaram duas classes diferentes de problemas, por exemplo, um teste avalia o ruído do produto e o outro avalia a resistência mecânica do mesmo. Nesse tipo de relação, o problema de teste pode ser dividido em dois, separados e tratados individualmente.

#### 2.4.4 – Síntese e Conclusões das Pesquisas Analíticas

Uma análise comparativa entre esses modelos matemáticos permite as seguintes conclusões: (1) Quase todos os modelos representam o problema de teste em desenvolvimento de produtos como um problema de busca - dado um conjunto de alternativas ou soluções possíveis, como o projetista deve proceder para encontrar a melhor solução, utilizando teste ou experimentação? O objetivo do projetista em realizar esta busca é gastar menos e consumir o menor tempo possível. As principais estratégias de buscas são: paralela, seqüencial e mista. A exceção é o trabalho de Thomke e Bell (2001) que lida com o problema de identificação e correção de problemas no projeto; (2) A maioria dos modelos supõe que o teste é perfeito, isto é, o teste revela o desempenho real da alternativa. As exceções são os trabalhos de Loch, Terwiesch e Thomke (2001) e de Thomke e Bell (2001); (3) A maioria dos modelos de testes assume que um único tipo de teste é disponível para o projetista. A exceção é o modelo de Thomke e Bell (2001) no qual vários tipos de testes são disponíveis para o projetista detectar erros de design; (4) As ferramentas matemáticas mais utilizadas nesses modelos são a programação dinâmica, a teoria estatística (particularmente *order statistics*) e a teoria da probabilidade; e, finalmente, (5) a aprendizagem é modelada como uma atualização Bayesiana de probabilidade no trabalho de Loch, Terwiesch e Thomke (2001). Mas eles lidam com uma situação especial na qual  $\{S_i | S_j\} = 0$  e  $\{F_i | S_j\} = 1$ . Em outros termos assumem uma única alternativa ótima de *design*. Outros modelos não tratam da aprendizagem no processo de desenvolvimento de produtos.

#### 2.5 – Síntese e Conclusões do Capítulo

No sentido mais geral, o *design* é a resolução de problema, e, de acordo com Baron (1994), toda resolução de problema envolve um processo de tentativas e erros. Utiliza-se esse processo de tentativas e erros por falta de conhecimento sobre o problema. No ponto de vista de testes em desenvolvimento de produtos, o método de tentativas e erros significa a realização de vários ciclos de testes do tipo DBT (Clark e Wheelwright, 1993). Mas, as tentativas são mais ou menos aleatórias. O termo “mais ou menos” quer dizer que as tentativas não são totalmente randômicas, e, sim, guiadas por conhecimentos e intuições. É interessante notar que a literatura de resolução de problemas não discute as condições de teste e subentende-se que as tentativas são realizadas em condições reais e não em laboratórios. Os estudos empíricos sobre testes e experimentação reconhecem a importâncias de tentativas e erros em desenvolvimento de produtos (Thomke, von Hippel e Frank, 1998; Lynn, Mazzuca, Marone e Paulson, 1998). Entretanto, essa revisão da literatura não identificou estudos

analíticos que focam o problema de teste e experimentação do ponto de vista do método de tentativas e erros.

Uma conclusão mais geral sobre essa revisão da literatura pode ser colocada da seguinte forma: as pesquisas descritivas mostram em detalhes toda a complexidade de desenvolvimento de produtos e processos, apesar de a cobertura desses estudos ainda ser restrita às grandes empresas e alguns poucos setores, como o automobilístico, o eletrônico e o farmacêutico. Os trabalhos analíticos procuram abstrair e entender uma parte pequena, talvez mais relevante, desta realidade complexa, utilizando modelos matemáticos. Entretanto, a impressão é que o volume de produção de pesquisas empíricas é bem maior que as analíticas<sup>32</sup>, e, portanto, as pesquisas analíticas estão sempre tentando “alcançar” os resultados das pesquisas empíricas.

Os modelos matemáticos desenvolvidos ao longo desses 40 anos vêm adotando várias suposições bastante fortes para simplificar a obtenção de soluções matemáticas, e duas das mais recorrentes são: (1) independência probabilística entre os resultados de teste de diferentes *designs*; e (2) um único tipo de teste é empregado para avaliar ou comparar as alternativas de *design*. A eliminação dessas suposições torna os modelos matemáticos muito mais complicados, mas ir além da independência probabilística e de um único tipo de teste pode redundar em resultados mais relevantes para os praticantes. Vários esforços recentes estão apontando para essa direção. O trabalho de Loch, Terwiesch e Thomke (2001) assume uma dependência probabilística entre os resultados de testes, apesar de esta dependência ainda ser muito específica. Os estudos empíricos liderados por Allen (Allen 1966; Frischmuth e Allen, 1969) e Marple (1961), já na década de 1960, mostraram que os projetistas utilizam uma gama enorme de experimentações, testes e outros meios para obter mais informações e reduzir riscos. Somente bem mais recentemente que pesquisadores como Thomke e Bell (2001) passaram a trabalhar com tipos diferentes de testes, mas no contexto de detecção de problemas ou erros de *design*.

A evolução das tecnologias de experimentação e de testes tem chamado a atenção não somente de praticantes mas também de pesquisadores em gestão de desenvolvimento de produtos. Estudos empíricos (Thomke e Reinstern, 1998; Thomke, von Hippel e Frank, 1998; Pisano, 1997; entre outros) mostram que as mudanças tecnológicas em produto, processo produtivo e teste/experimentação têm impactos significativos em desempenho e estratégia de realização de testes nos segmentos industriais pesquisados.

---

<sup>32</sup> Essa impressão resulta de uma avaliação qualitativa, por este autor, dos quase 200 artigos e livros, mais citados na área de desenvolvimento de produtos, revisados por Krishnan e Ulrich (2001).

Pesquisas analíticas que exploram o impacto dessas evoluções tecnológicas em estratégia ótima de testes são ainda incipientes; são geralmente modelos desenvolvidos para orientar as pesquisa empíricas. Exemplos são o modelo do Pisano (1997), descrito na Seção 2.3, para relacionar testes laboratoriais (imperfeitos) com os testes em plantas comerciais (reais e perfeitos), e o modelo do Thomke (1998), para definir o melhor momento de mudar o tipo de teste utilizado no desenvolvimento de circuitos integrados.

A presente pesquisa procura, então, contribuir para a literatura de pesquisa analítica focando nas seguintes lacunas identificadas:

- Incorporar dependências probabilísticas, denominadas de influências, neste trabalho, entre resultados de testes e como estas dependências podem afetar a estratégia ótima dos testes. Esta pesquisa identificou dois tipos de influências: as influências entre os *designs*, através dos resultados de testes imperfeitos e as influências entre os próprios testes imperfeitos, denominadas de confiabilidades condicionadas.
- Incorporar vários tipos de testes no processo de desenvolvimento e analisar o seu impacto na estratégia ótima de teste. A inclusão de vários tipos de testes, e as possíveis influências entre eles, no processo de desenvolvimento, permite a avaliação da estratégia de tentativa e erro, testando diretamente, em condições reais, contra as estratégias de testar inicialmente em condições laboratoriais (testes imperfeitos) e depois realizar testes reais. Adicionalmente, diferentes testes imperfeitos podem representar diferentes tecnologias de protótipos ou condições de teste e, portanto, permitem analisar impactos das novas tecnologias em estratégias de testes.

## **CAPÍTULO 3**

### **PROBLEMA DE TESTES COM UMA ALTERNATIVA DE *DESIGN***

### 3.1 – Introdução

Uma dificuldade fundamental em elaborar modelos matemáticos está em conciliar adequadamente duas forças antagônicas. De um lado, os modelos devem representar apropriadamente o fenômeno em questão, pois, caso contrário, a validade das conclusões obtidas a partir do modelo pode ser questionada. Em geral, quanto mais realismo é incorporado a um modelo, mais complexo ele é. Por outro lado, há a necessidade de ter modelos os mais simples possível<sup>33</sup>. A complexidade de um modelo pode tornar a sua manipulação difícil e, conseqüentemente, reduzir a sua utilidade como um instrumento para entender melhor o fenômeno. Os modelos desenvolvidos nesta pesquisa são resultado do esforço de balancear essas forças.

A resolução dessa dualidade é auxiliada imensamente pela existência de uma base crescente de literatura acadêmica em desenvolvimento de produtos (revisada no capítulo anterior). As pesquisas empíricas fornecem o conhecimento disponível sobre a realidade de desenvolvimento de produtos nas empresas, e, particularmente, sobre o uso de testes como um instrumento poderoso para resolver os problemas encontrados pelos engenheiros durante o desenvolvimento de um novo produto. As pesquisas analíticas mostram os caminhos já explorados de modelagem para entender as estratégias de testes nos projetos de desenvolvimento de produtos. O presente estudo procura aproveitar ao máximo esse conhecimento da literatura para a confecção dos modelos, apresentados neste capítulo e no próximo, que serão utilizados para responder às questões de pesquisa.

### 3.2 – Formulação de Problemas de Teste em Desenvolvimento de Produto

Descreve-se, nesta seção, a definição do problema de teste que será a base para a formulação de modelos analíticos para este capítulo e o seguinte (Capítulo 4). A modelagem de um problema real requer suposições simplificadoras para viabilizar a sua análise, e esta pesquisa não é exceção. Entretanto, procurou-se explicitar e justificar essas suposições ao longo deste texto.

Dadas as questões de pesquisa propostas (Seção 1.3), dentro dos modelos matemáticos examinados na literatura, aquele que incorpora a abordagem mais adequada para a presente pesquisa é o modelo desenvolvido por Abernathy e Rosenbloom (1968).

---

<sup>33</sup> Este processo de modelagem é conhecido como "requisite decision modeling" (Clemen e Reilly, 2001, p. 8).

No modelo de Abernathy e Rosenbloom (revisado na Subseção 2.4.2), os autores optaram por poucas alternativas de projeto e poucos estágios de interação seqüenciais, o que permite a incorporação de mais detalhes operacionais de um projeto de desenvolvimento do que outros modelos. Os autores justificam essa abordagem: “Este trabalho descreve uma estrutura analítica simples que pode ajudar os gerentes a tomar melhores decisões sobre o emprego de estratégia paralela de desenvolvimento. O trabalho é voltado para as decisões tomadas em organizações reais em vez de tratar a teoria da otimização” (Abernathy e Rosenbloom, 1968, p. 3). Os autores reconhecem a extrema dificuldade de estabelecer um procedimento ótimo de seleção com um grande número de alternativas, num horizonte de  $n$  ciclos (*stages*) de desenvolvimento, típico de modelos de programação dinâmica, como os que seriam posteriormente desenvolvidos por Weitzman (1979) e Loch, Terwiesch e Thomke (2001). Entretanto, os autores argumentam que os problemas reais envolvem um número relativamente pequeno de alternativas e, no máximo, dois ou três ciclos de desenvolvimento. Esses argumentos de Abernathy e Rosenbloom, de 1968, são válidos ainda hoje: o trabalho de Loch, Terwiesch e Thomke (2001) mostra que numa situação em que o teste não é perfeito, a técnica tradicional de programação dinâmica não consegue resolver o problema, pois as probabilidades de transição são dependentes do estado.

Como a presente pesquisa pretende estudar as situações de desenvolvimento de produtos nas quais os testes são imperfeitos e as alternativas de projetos são relacionadas probabilisticamente, uma abordagem menos restritiva de modelagem se faz necessária.

A formulação do problema de testes, neste estudo, supõe que eles são realizados em todas as tarefas de um projeto de desenvolvimento de produtos (Clark e Wheelwright, 1993, p. 599). Essas tarefas envolvem desde a geração de idéias, a definição da arquitetura do produto, o detalhamento de subsistemas e seus componentes, a integração do produto, a produção piloto e o lançamento comercial (Figura 1.1). Na etapa inicial de definição do projeto, testes como grupos focais ou entrevistas com consumidores são realizados para selecionar os conceitos do produto. Na etapa de projeto de subsistemas, testes de engenharia são realizados para avaliar o desempenho técnico das alternativas. Na etapa final, protótipos completos são empregados para identificar as deficiências técnicas, avaliar a reação dos consumidores e testar o processo produtivo.

Em cada situação de teste, o projetista o utiliza como um meio para conhecer o desempenho de cada alternativa, o que permite que seja avaliada e comparada às várias alternativas de *design* disponíveis. A responsabilidade do projetista é selecionar a melhor alternativa para a próxima etapa do projeto. A avaliação e a comparação, geralmente, são

feitas de acordo com os objetivos de teste, e essa formulação supõe que são dois os principais objetivos de testes: primeiro, medir a preferência dos consumidores em relação ao produto ou subsistema; e, segundo, medir o desempenho técnico do produto. Um teste pode ter somente um desses objetivos ou uma combinação deles.

Os componentes principais dos modelos a serem desenvolvidos são:

- Alternativas de *design* – São idéias ou soluções para o problema de projeto focado. Uma idéia ou solução pode ser representada em muitas formas diferentes: um desenho, uma maquete, um programa de *software*, uma formula matemática, e um protótipo completo. Cada forma de representação é denominada de objeto de teste.
- Alternativas de teste – São diferentes maneiras de avaliar, medir, analisar uma alternativa de projeto. Cada tipo de teste pode exigir uma forma de representação do *design* ou objeto de teste específico. Geralmente, o projetista dispõe de vários tipos de testes para diferenciar as alternativas de *design*. Por exemplo, para avaliar a aerodinâmica de um projeto de avião, o projetista pode utilizar o túnel de vento ou a simulação no computador. Esses testes utilizam tecnologias distintas para atender ao mesmo objetivo: avaliar o desempenho aerodinâmico das alternativas de *design*.

A execução de um teste envolve o ciclo de “*design, build and test*” de Clark e Wheelwright (1993). A atividade de *design* corresponde às tarefas de projetar o produto ou seu subsistema e de planejar o teste, o que requer, entre outras atividades, a definição sobre o tipo de teste a ser empregado e, se for o caso, a forma de representação, ou objeto de teste, das alternativas de *design*. A atividade *build* corresponde à construção dos objetos e aparatos de teste. A atividade *test* corresponde à execução de testes e análise dos resultados. Para os modelos matemáticos deste capítulo e do próximo, este ciclo é caracterizado por seus três parâmetros principais: custo, prazo e confiabilidade do teste<sup>34</sup>. O custo de executar um teste envolve os gastos para confeccionar os objetos de testes, construir (se eles não existirem) e operar os aparatos de teste, elaborar o procedimento (se não estiver disponível) e analisar os resultados de teste. O prazo do teste é o tempo decorrido entre o início e o fim do ciclo. A confiabilidade é uma medida da capacidade de um resultado de teste inferir o desempenho real do projeto<sup>35</sup>. Um teste é perfeito quando o desempenho real do *design* pode ser inferido,

<sup>34</sup> Loch, Terwiesch e Thomke (2001) utilizaram esses mesmos parâmetros para caracterizar os testes. Dahan e Mendelson (2001) e Abernathy e Rosenbloom (1968) usaram somente dois parâmetros: custo e prazo, pois estes dois trabalhos assumiram que os testes são perfeitos.

<sup>35</sup> Uma explanação mais rigorosa do conceito da confiabilidade está no Capítulo 1.

sem erro, pelo resultado de teste<sup>36</sup>. Isto ocorre quando o teste é realizado com o protótipo completo, em condições reais de operação. Nos modelos desenvolvidos nestes dois capítulos (3 e 4), essa situação é exemplificada pelo lançamento do *design* no mercado.

Os modelos deste estudo representam uma situação de teste em que o projetista dispõe inicialmente de algumas alternativas de projeto, mas não possui informação suficiente para priorizá-las de acordo com os objetivos da etapa em questão. Ele conhece os tipos de testes que pode utilizar e seus parâmetros, como custo, prazo e confiabilidade. A incerteza sobre o desempenho de cada alternativa de *design* é representada por uma distribuição de probabilidade que denota o nível de conhecimento do projetista sobre a alternativa. Para obter mais informações sobre as alternativas, o projetista pode decidir realizar um ciclo de “*design-build-test* (DBT)”. Isto requer que ele selecione um conjunto de alternativas de *design*, que pode ser um subconjunto das alternativas originais, e define um tipo de teste a ser empregado. Os resultados desse ciclo de DBT são informações novas, que podem ser utilizadas para incrementar o conhecimento do projetista sobre as alternativas. Estas acumulações de conhecimento são representadas, nos modelos, por modificações nas distribuições de probabilidades de desempenho. Esse é o processo de modelar matematicamente a aprendizagem durante o desenvolvimento de produtos, utilizado, por exemplo, por Loch, Terwiesch e Thomke (2001).

Uma vez recebendo os resultados do primeiro ciclo DBT e atualizando seu conhecimento, o projetista pode decidir terminar a busca e selecionar a melhor alternativa, ou realizar o segundo ciclo de DBT, que requer que ele defina, outra vez, um conjunto de alternativas e um tipo de teste a ser utilizado. Esse processo pode ser repetido várias vezes, até que o projetista decida parar e ficar com a melhor alternativa de projeto.

Nessa formulação do problema de teste, o projetista pode selecionar, em cada ciclo DBT, as alternativas de projeto e o teste a ser realizado. Dependendo do número de alternativas de projeto e de testes, as possíveis estratégias de testes podem ser muitas. Uma estratégia de teste possível é testar só uma alternativa de *design* em cada ciclo, usando um tipo de teste. Outra estratégia é testar todas as alternativas de *design* em um ciclo, utilizando um determinado teste. A primeira estratégia é conhecida como estratégia seqüencial e a segunda é a paralela (Abernathy e Rosenbloom, 1968). Uma terceira possibilidade é a estratégia mista, que combina a paralela com a seqüencial. A questão chave é: qual é a melhor estratégia de teste?

---

<sup>36</sup> Uma discussão mais detalhada sobre o conceito de teste perfeito está no Capítulo 1, Seção 1.3.

A melhor estratégia de teste, para os modelos deste estudo, é aquela que maximiza o valor presente esperado de lucro. Os custos na equação de lucro são os de teste e a receita é uma função simples do desempenho real do projeto. Um bom desempenho, técnico e/ou mercadológico, implicaria uma receita maior. O cálculo de valor presente incorpora uma taxa de desconto para o fluxo de caixa, de acordo com o tempo da ocorrência, de maneira que a realização de testes, com duração maior, reduziria o valor presente da receita em potencial. Esta abordagem, portanto, é similar à de Abernathy e Rosenbloom (1968), mas é diferente da de Loch, Terwiesch e Thomke (2001), que define a estratégia ótima como aquela que minimiza o custo total esperado.

Este capítulo discute modelos de testes com uma única alternativa de *design*. A próxima seção introduz o modelo mais simples, com o objetivo de apresentar os símbolos e a estrutura de modelagem a serem empregados nas outras seções. Este modelo representa uma situação em que o projetista dispõe somente de um único tipo de teste, que é perfeito. A decisão do projetista é adotar ou abandonar a alternativa do *design*, mas ele tem a opção de testar a alternativa antes de tomar essa decisão. A Seção 3.3 apresenta o modelo ainda com uma alternativa de *design*, mas agora dispondo de dois tipos de testes, sendo um perfeito. A Seção 3.4 trata da situação com uma alternativa de *design* e três tipos de testes, sendo um perfeito. A disponibilidade de dois testes imperfeitos permite tratar da inter-relação entre os mesmos. O Capítulo 4 apresenta um modelo de teste com duas alternativas de *design* e dois testes, sendo um perfeito. Esse modelo permite analisar as influências entre os dois *designs* e avaliar o impacto na determinação da estratégia ótima.

### 3.3 – Problema com uma Alternativa de *Design* e um Teste Perfeito

Supondo que o projetista enfrenta um problema de desenvolvimento e, depois de um esforço de busca por soluções, gerou uma única alternativa de solução, além da opção de conviver com o problema. Supondo, adicionalmente, que a única forma de verificar se a alternativa gerada seria a solução para o problema é testá-la em condições reais de operação que, pela definição, é então um teste perfeito. O teste perfeito representa, então, neste e noutros modelos desta pesquisa, a avaliação de um protótipo completo em condições reais de operação. Portanto, o resultado do teste perfeito é o resultado final ou real do *design*. O resultado deste teste pode assumir somente dois possíveis estados: sucesso (*S*) ou fracasso (*F*)<sup>37</sup>. Se a alternativa gerada for um fracasso, o projetista deve conviver com o problema

---

<sup>37</sup> Essa é a abordagem utilizada por Abernathy e Rosenbloom (1968) para representar os resultados de desenvolvimento de produto.

original ou abandonar o projeto. O projetista precisa, então, selecionar entre a adoção da alternativa gerada ou a convivência com o problema.

Os parâmetros deste problema são<sup>38</sup>:

$\{sucesso\} = \{S\} = s =$  probabilidade de sucesso da alternativa gerada,

$C =$  custo do teste perfeito,

$R =$  receita no caso de sucesso,

$r =$  receita no caso de fracasso, e

$R > r > 0$ .

A comparação entre a decisão de adotar a alternativa gerada e a de conviver com o problema é feita pelo valor esperado de lucro (VE). Para simplificar os cálculos, esse valor esperado não está incluindo a duração do teste perfeito, que poderia afetar os valores das receitas. Os valores esperados são:

$$VE_{\text{alternativa}} = s R + (1 - s) r - C, \text{ e}$$

$$VE_{\text{convivência}} = 0.$$

O projetista adotaria a alternativa gerada se

$$VE_{\text{alternativa}} > VE_{\text{convivência}}.$$

Isto ocorre quando

$$s > (C - r) / (R - r).$$

O valor do termo  $[(C - r) / (R - r)]$  pode ser interpretado como uma probabilidade crítica de sucesso da alternativa gerada. Se a  $s = \{sucesso\}$  for menor que esse valor crítico, não valeria a pena adotar a alternativa gerada. Nota-se que esse valor crítico é alto se o custo de teste perfeito ( $C$ ) for alto. Por outro lado, uma maior receita do sucesso ( $R$ ) reduziria essa probabilidade crítica. Estas conclusões coincidem com a intuição.

<sup>38</sup> Relembrando que, neste trabalho, a notação  $\{E\}$  representa a probabilidade do evento  $E$ .

A probabilidade  $\{sucesso\}$  tem que satisfazer outra condição imposta pela teoria de probabilidade:

$$s \leq 1.$$

Substituindo esta condição, na penúltima inequação, o resultado é:

$$C \leq R.$$

Este resultado indica que o custo,  $C$ , de teste, tem que ser menor do que a receita de sucesso,  $R$ , para que a alternativa gerada seja escolhida. Caso contrário, a probabilidade de sucesso,  $s = \{sucesso\}$ , do projeto tem que ser maior que 1,0 e isto não faz sentido.

### 3.4 – Problema com uma Alternativa de *Design* e Dois Testes

Neste problema, o projetista possui dois testes, sendo um perfeito e outro imperfeito, e uma alternativa gerada, para resolver o problema, além da alternativa de conviver com o mesmo. Somente executando o teste perfeito é que o projetista conhecerá se a alternativa gerada soluciona o problema (sucesso) ou não (fracasso). Os resultados do teste imperfeito são: “positivo” ou “negativo”, representados, respectivamente, por símbolos “+” ou “-”<sup>39</sup>. O projetista pode usar essa informação para inferir a chance de sucesso ou não da alternativa gerada. Outros parâmetros do teste imperfeito são:

$$C_t = \text{custo de teste imperfeito, e} \\ \{+ | S\} = \{- | F\} = f = \text{confiabilidade do teste imperfeito.}$$

A igualdade entre  $\{+ | S\}$  e  $\{- | F\}$  é uma suposição para simplificar o modelo. A confiabilidade de teste imperfeito deve ser menor que 1,0 e igual ou maior que 0,5. Por definição, a confiabilidade do teste perfeito é igual a 1,0. Os símbolos para outros parâmetros são os mesmos do problema da Seção 3.2.

<sup>39</sup> Esta forma de representar os resultados de teste imperfeito é a de Loch, Terwiesch e Thomke (2001)

Esse problema de teste pode ser representado por uma árvore de decisão, Figura 3.1, na qual as alternativas decisórias iniciais (ponto de decisão A na Figura 3.1) são: lançar (realizar o teste perfeito) o *design*, testar o *design* (teste imperfeito) e abandonar. O abandono redonda em um valor zero, representando o *status quo*. Os custos de lançamento e de teste imperfeito,  $C$  e  $C_t$ , são colocados debaixo dos ramos, representando as respectivas alternativas. Os círculos indicam os pontos de incerteza. A decisão de lançar pode resultar em “sucesso” ( $S$ ) e uma receita  $R$ , com a probabilidade  $s = \{sucesso\}$ , ou em “fracasso” ( $F$ ) e uma receita  $r$ , com a probabilidade  $(1 - s)$ . No ponto de decisão B2, na Figura 3.1, o projetista recebe a informação de que o resultado de teste imperfeito é “negativo” e precisa então decidir entre lançar ou abandonar. Se lançar, o custo é  $C$  e a chance de ter sucesso e uma receita  $R$  é  $\{S | -\}$ . Essa probabilidade condicional representa uma atualização de conhecimento, ou aprendizagem, do projetista, sobre a alternativa gerada.

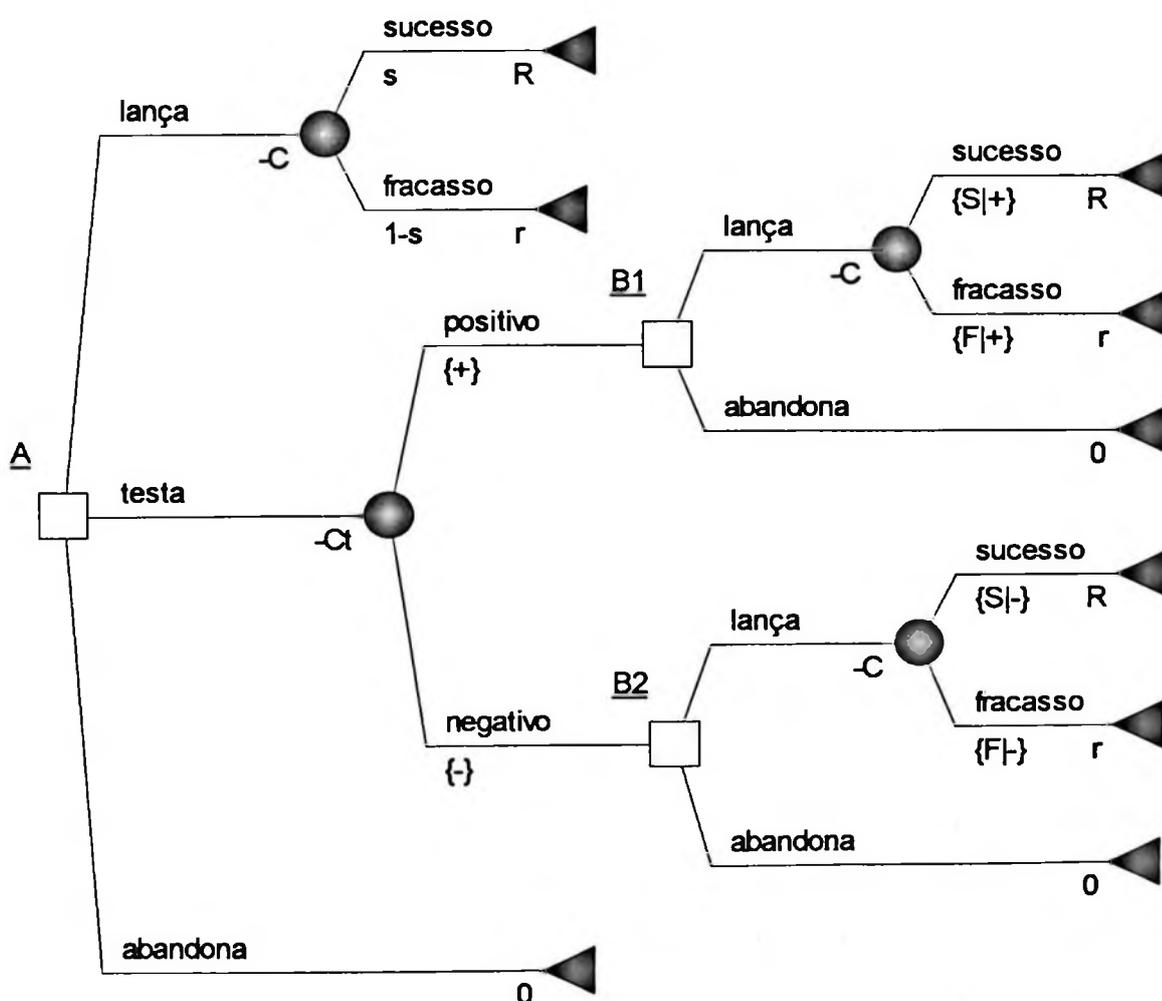


Figura 3.1 – Árvore de Decisão do Problema de uma Alternativa e Dois Testes

Com um teste a mais, o projetista dispõe de mais estratégias de testes. Por exemplo, ele pode executar o teste imperfeito primeiro, e, dependendo do resultado, pode utilizar o teste perfeito ou conviver com o problema (abandonar o projeto). Outra opção é executar logo o teste perfeito (Estratégia de Teste Perfeito). Como somente uma alternativa de *design* é gerada, a decisão de executar o teste perfeito equivale à seleção deste *design* como a solução para o problema original.

A opção de utilizar inicialmente o teste imperfeito redundando em quatro estratégias, que são as possíveis combinações entre os resultados observados do teste e as decisões subsequentes (Tabela 3.1). Como exemplo, a Estratégia I 4 estabelece as seguintes regras decisórias: o projetista deve conviver com o problema (ou abandonar o projeto) depois de observar um resultado positivo (+) do teste imperfeito e deve executar o teste perfeito quando observa um resultado negativo (-).

**Tabela 3.1 – As Quatro Estratégias de Teste Imperfeito**

<i>Estratégia de teste imperfeito</i>	<i>Resultado de teste imperfeito</i>	<i>Decisão subsequente</i>
Estratégia I 1	+	Executa teste perfeito
	-	Convive com o problema
Estratégia I 2	+	Executa teste perfeito
	-	Executa teste perfeito
Estratégia I 3	+	Convive com o problema
	-	Convive com o problema
Estratégia I 4	+	Convive com o problema
	-	Executa teste perfeito

Analisando-se qualitativamente essas quatro estratégias da Tabela 3.1, pode-se concluir que: (1) A Estratégia I 2 é dominada pela Estratégia de Teste Perfeito, pois se a decisão é executar o teste perfeito, independentemente do resultado do teste imperfeito, então a melhor opção é não realizar o teste imperfeito e, portanto, economizar o seu custo; e (2) A Estratégia I 3 é dominada pela Estratégia de Abandono, pois se a decisão é conviver com o problema, independentemente do resultado do teste imperfeito, então a melhor opção é não realizar o teste imperfeito e abandonar o projeto no ponto de decisão inicial A. Conseqüentemente, essas duas estratégias dominadas não são mais consideradas como candidatas à melhor alternativa.

A comparação entre as estratégias é realizada através do valor esperado de cada uma. A derivação da expressão do valor esperado de cada estratégia é apresentada a seguir. Apesar de as Estratégias I 2 e I 3 serem dominadas, as equações de seus valores esperados são também apresentadas, com o objetivo de confirmar as análises qualitativas.

Analisa-se, inicialmente, a Estratégia do Teste Perfeito, que consiste em executar logo o teste perfeito, portanto, não utilizando o teste imperfeito. O valor esperado desta estratégia ( $VE_p$ ) é:

$$VE_p = \{S\}R + \{F\}r - C.$$

Definindo  $\{S\} = s$  e lembrando que  $\{F\} = 1 - s$ , a expressão da  $VE_p$  é simplificada para

$$VE_p = sR + (1 - s)r - C, \text{ ou}$$

$$VE_p = s(R - C) + (1 - s)(r - C).$$

(Equação 3.1)

Derivam-se, a seguir, as expressões de valor esperado das quatro estratégias, da Tabela 3.1, vinculadas à opção inicial de usar o teste imperfeito.

O valor esperado da Estratégia I 1 é:

$$VE_{I1} = \{+\}\{\{S|+\}R + \{F|+\}r - C\} - Ct.$$

A expressão associada ao resultado de teste negativo, “-”, não está na equação acima porque a decisão de conviver com o problema implica um valor esperado zero (manutenção do *status quo*). Decompondo as expressões  $\{+\}$ ,  $\{S|+\}$  e  $\{F|+\}$  em função dos parâmetros conhecidos pelo projetista no início da resolução do problema, pode-se obter, em seqüência,

$$\{+\}\{S|+\} = \{S+\} = \{+|S\}\{S\} = f \cdot s, \text{ e}$$

$$\{+\}\{F|+\} = \{F+\} = \{+|F\}\{F\} = (1 - \{-|F\})(1 - \{S\}) = (1 - f)(1 - s).$$

Substituindo-se essas expressões na equação de  $VE_{I1}$ , e re-arranjando-as, chega-se à equação

$$VE_{I1} = s(R - C)f + (1 - f)(1 - s)(r - C) - Ct$$

(Equação 3.2)

O valor esperado da Estratégia I 2 é:

$$VE_{I2} = \{+\}(\{S|+\}R + \{F|+\}r - C) + \{-\}(\{S|-\}R + \{F|-\}r - C) - Ct.$$

Decompondo as probabilidades da equação acima, de forma análoga à dedução realizada para a Estratégia I 1, chega-se a

$$\begin{aligned} VE_{I2} &= sR + (1-s)r - C - Ct, \text{ ou} \\ VE_{I2} &= s(R - C) + (1-s)(r - C) - Ct. \end{aligned}$$

(Equação 3.3)

Uma comparação da equação do acima com a da Estratégia de Teste Perfeito (Equação 3.1) confirma a análise qualitativa, pois o  $VE_{I2}$  é sempre menor que o  $VE_p$ , e a diferença é exatamente o custo do teste imperfeito  $Ct$ .

O valor esperado da Estratégia I 3 é:

$$VE_{I3} = -Ct,$$

(Equação 3.4)

pois independentemente dos resultados do teste imperfeito, o projetista decide conviver com o problema e, portanto, incorrerá o custo de realizar o teste imperfeito, confirmando a análise qualitativa que a Estratégia I 3 é dominada pela Estratégia de Abandono.

O valor esperado da Estratégia I 4 é:

$$VE_{I4} = \{-\}(\{S|-\}R + \{F|-\}r - C) - Ct.$$

Decompondo as probabilidades, chega-se a

$$VE_{I4} = (1-f)s(R - C) + f(1-s)(r - C) - Ct.$$

(Equação 3.5)

Finalmente, o projetista ainda pode optar pela estratégia de conviver com o problema desde o início, não realizando nenhum dos dois testes. Esta é a Estratégia de Abandono e o seu valor esperado  $VE_A$  é:

$$VE_A = 0$$

(Equação 3.6)

pois não incorrerá custos e receitas adicionais.

Uma vez determinado o valor esperado de cada uma das estratégias, a próxima tarefa é identificar a melhor estratégia, aquela com o maior valor esperado. Essa identificação envolve somente as estratégias não dominadas: Estratégia de Teste Perfeito, Estratégia de Abandono, Estratégias I 1 e I 4 da Tabela 3.1.

A comparação entre as estratégias não dominadas exige a definição dos valores relativos dos parâmetros  $R$  (receita do sucesso),  $r$  (receita do fracasso) e  $C$  (custo do teste perfeito), onde  $R > r$ . São três cenários possíveis a serem considerados:

- Cenário I: O custo do teste perfeito é maior do que as receitas de sucesso e de fracasso, isto é  $C > R > r$ . Dado o alto custo do teste perfeito, é natural que a melhor estratégia é a de Abandonar ( $VE_A=0$ ). Isto é confirmado ao se verificar os valores esperados de outras estratégias: todos são negativos, pois

$$R - C < 0, e$$

$$r - C < 0.$$

- Cenário II: O custo do teste perfeito é menor que as receitas de sucesso e de fracasso, isto é  $R > r > C$ . O baixo custo do teste perfeito deve favorecer a estratégia de executar diretamente este teste. Isto é confirmado ao se analisar as equações de valor esperado. Em primeiro lugar, nota-se que o  $VE_p > 0$ , portanto  $VE_p > VE_A$ . E, em segundo lugar, o  $VE_p$  é maior que  $VE_{I1}$  e  $VE_{I4}$ , pois a confiabilidade  $f$  é sempre menor, ou, no máximo, igual a 1,0 e ainda existe o custo  $Ct$  nas estratégias de teste imperfeito. Portanto, se o custo de teste perfeito for abaixo das receitas, o projetista não deve utilizar o teste imperfeito, independentemente dos valores de  $s$ ,  $f$ ,  $C$  e  $Ct$ .
- Cenário III: O custo do teste perfeito é menor que a receita do sucesso, mas é maior que a receita do fracasso, isto é  $R > C > r$ . Neste cenário, pode-se demonstrar, em primeiro lugar, que a Estratégia I 4 é dominada pela Estratégia I 1, e, em segundo lugar, a melhor estratégia entre os três restantes depende dos valores específicos assumidos pelos parâmetros  $f$ ,  $s$ ,  $r$ ,  $R$ ,  $C$  e  $Ct$ . A dominância da Estratégia I 1 sobre a I

4 pode ser concluída se comparando os componentes das respectivas equações de valor esperado (Equação 3.2 e Equação 3.5), lembrando que a confiabilidade  $f > 0,5$  e  $R > C > r$ :

$$s(R - C)f > s(R - C)(1 - f), \text{ e}$$

$$(1 - s)(r - C)(1 - f) > (1 - s)(r - C)f.$$

De onde pode-se concluir que  $VE_{II} > VE_{I4}$  no Cenário III.

A melhor alternativa entre as três estratégias restantes, no Cenário III, varia de acordo com os valores assumidos pelos parâmetros  $f$ ,  $s$ ,  $r$ ,  $R$ ,  $C$  e  $Ct$ . Apresentam-se, a seguir, algumas situações em que a melhor estratégia pode ser uma das restantes.

A primeira situação assume que a confiabilidade do teste imperfeito,  $f$ , seja muito próxima de 100%, isto é,  $f \rightarrow 1,0$ . Reescrevendo a equação do valor esperado da Estratégia I 1:

$$VE_{I1} \rightarrow s(R - C) - Ct.$$

Comparando essa expressão com o  $VE_p$ , pode-se concluir que a melhor estratégia pode ser qualquer uma das três, dependendo dos valores assumidos por  $s$ ,  $r$ ,  $C$  e  $Ct$ . Por exemplo, um menor valor de  $Ct$  e um maior valor de  $C$  favorecem a estratégia I 1. Por outro lado, se os dois custos de testes forem muito altos, favorecem a estratégia de Abandono.

A segunda situação assume que a probabilidade de sucesso é quase 100%, o que resulta em

$$VE_p \cong R - C, \text{ e}$$

$$VE_{I1} \cong (R - C)f - Ct,$$

em que a melhor estratégia é a do Teste Perfeito.

### 3.5 – Problema com uma Alternativa de *Design* e Três Testes

Esta seção analisa o mesmo problema de teste da anterior, mas com um teste imperfeito a mais. O objetivo é entender as possíveis influências ou interações entre os

resultados de testes imperfeitos diferentes e definir os parâmetros que caracterizam essas relações entre testes. Como foi mostrada na revisão da literatura (Capítulo 2), os modelos analíticos existentes geralmente assumem a existência de um único tipo de teste. Quando mais de um tipo de teste é disponível (Thomke e Bell, 2001), geralmente, as relações entre os mesmos são simplificadas. Entretanto, na realidade do desenvolvimento de produtos, a equipe do projeto emprega vários testes para avaliar as alternativas de *design*. Por exemplo, um *design* é testado inicialmente num *software* CAE e obteve um resultado encorajador. Esse resultado pode, então, influenciar a decisão do projetista de testá-lo num protótipo físico (custando bem mais), pois, dado que o teste em CAE deu certo, é plausível assumir que a chance de ter resultado positivo com o protótipo físico aumentaria, reduzindo, portanto, seu risco. Essas influências ou interações entre os testes imperfeitos são tratadas como dependências probabilísticas neste capítulo.

A seqüência de apresentação desta seção inicia com a formulação matemática do problema com um teste imperfeito adicional, seguida da derivação das relações probabilísticas do problema, depois, da identificação dos parâmetros de influência e, finalmente, da análise dos parâmetros que definem as influências entre os dois testes imperfeitos.

### 3.5.1 – Formulação do Problema

O problema de teste tratado aqui envolve uma alternativa de *design* que pode ser avaliada por dois testes imperfeitos ( $T_1$  e  $T_2$ ) e um teste perfeito (lançamento). As estratégias de testes, nesse problema, são várias, e algumas delas são: não usar nenhum teste imperfeito, i.e., usar diretamente o teste perfeito; usar somente um teste imperfeito e decidir abandoná-lo ou lançá-lo baseando-se no seu resultado; usar dois testes imperfeitos em seqüência, tomar decisões de continuar com um ou outro ou abandoná-los, depois de cada teste (observando seu resultado); ou usar os dois testes imperfeitos simultaneamente e depois tomar a decisão de lançá-los ou não.

A questão chave do projetista continua a mesma: qual é a melhor estratégia de teste para uma determinada condição de problema? Entretanto, esta seção foca numa questão específica: como as influências ou interações entre os resultados de testes podem afetar a avaliação das estratégias de teste? Um entendimento claro dessa questão é uma condição necessária para responder à questão chave.

Apresentam-se a seguir os parâmetros dos três testes do problema:

- Características do teste 1 ( $T_1$ )

- Resultados ( $r_1$ ): + ou -
- Confiabilidades do  $T_1$ :  $f_1 = \{+|S\} = \{-|F\} = g_1$  onde  $S$  = sucesso do *design* no mercado e  $F$  = fracasso do *design* no mercado
- Custo  $C_1$  e prazo  $t_1$
- Características de teste 2 ( $T_2$ )
  - Resultados ( $r_2$ ) = 1 ou 0
  - Confiabilidade do  $T_2$ :  $f_2 = \{1|S\} = \{0|F\} = g_2$
  - Custo  $C_2$  e prazo  $t_2$
- Características do teste perfeito “lançamento” ( $T_3$ ):
  - Resultado ( $r_3$ ):  $S$  ou  $F$
  - Custo de lançamento:  $C_l$
  - Prazo para observar resultado:  $t_l$
  - Retorno do lançamento:  $R$  (quando ocorre  $S$ ) ou zero (quando ocorre  $F$ )

O resultado do teste 2 ( $T_2$ ) pode ser “1” ou “0”, assume-se que o primeiro representa um resultado favorável para o *design* e o segundo desfavorável. Suponha-se que a relação entre as confiabilidades dos dois testes imperfeitos seja  $0,5 \leq f_1 \leq f_2 \leq 1,0$ ; e, adicionalmente, a probabilidade *a priori* de sucesso da alternativa de *design* é  $\{S\} = s$ .

### 3.5.2 – Relações Probabilísticas

Esta seção desenvolve as probabilidades relevantes para a resolução do problema com dois testes imperfeitos. Para melhor entender a necessidade de tratar essas probabilidades, ilustra-se com um exemplo. Supondo-se que  $r_i$  é o resultado do teste  $i$ ,  $i = 1, 2, 3$ , onde  $r_3$  é o resultado real (observado após lançamento), então, se o projetista optar por testar  $T_2$  primeiro,  $T_1$  segundo e depois lançar, ele vai observar  $r_2$ ,  $r_1$  e  $r_3$ , nesta seqüência. Isto significa que o projetista decidiu realizar  $T_1$  dado o resultado de  $T_2$  e decidiu realizar o lançamento dado os resultados de  $T_2$  e  $T_1$ .

Antes de realizar essa seqüência de testes, o projetista não pode prever com certeza os possíveis resultados dos mesmos. Ele pode, entretanto, imaginar as possíveis conseqüências e estimar as respectivas probabilidades de ocorrência. Isto é, ele pode representar os possíveis resultados de  $T_2$  com a probabilidade  $\{r_2\}$ , onde  $r_2$  pode ser 1 ou 0. Uma vez observado o

resultado de  $T_2$ , ele pode inferir a probabilidade de obter  $r_1$  através da probabilidade condicional  $\{r_1|r_2\}$ , onde  $r_1$  pode ser “+” ou “-”.

Finalmente, com os resultados dos testes  $T_1$  e  $T_2$ , o projetista pode inferir a possível consequência de lançar o produto no mercado. Isto pode ser representado pela expressão  $\{r_3|r_1r_2\}$  que é a probabilidade de obter resultado  $r_3$ , onde  $r_3$  pode ser  $S$  ou  $F$ , dados os resultados dos testes imperfeitos  $r_1$  e  $r_2$ .

Um dos objetivos desta seção é desenvolver as probabilidades  $\{r_2\}$ ,  $\{r_1|r_2\}$  e  $\{r_3|r_1r_2\}$ , em função de parâmetros conhecidos, tais como  $s$ ,  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $g_1$ ,  $g_2$ , e os novos parâmetros que representam as inter-relações entre  $T_1$  e  $T_2$ . No desenvolvimento dessas probabilidades, a distinção entre  $f_i$  e  $g_i$ ,  $i = 1$  ou  $2$ , é mantida para obter expressões mais genéricas. Para que os resultados sejam aplicáveis para qualquer seqüência de testes pela qual o projetista optasse adotar, o desenvolvimento algébrico é realizado nas probabilidades genéricas  $\{r_i\}$ ,  $\{r_j|r_i\}$  e  $\{r_3|r_jr_i\}$ , onde  $i = 1$  e  $j = 2$  ou  $i = 2$  e  $j = 1$ .

### **Representação da probabilidade $\{r_i\}$**

Utilizando a regra de expansão da teoria de probabilidade, pode-se escrever:

$$\{r_i\} = \{r_i|S\}\{S\} + \{r_i|F\}\{F\}, \quad (\text{Equação 3.7})$$

onde  $\{r_i|S\}$  e  $\{r_i|F\}$  representam as confiabilidades do  $T_i$ . Por exemplo, se  $T_i = T_2$  e  $r_2 = 1$ :

$$\begin{aligned} \{r_2\} &= \{1|S\}\{S\} + \{1|F\}\{F\}, \text{ ou} \\ \{r_2\} &= f_2 \cdot s + (1 - g_2) \cdot (1 - s) \end{aligned}$$

### **Representação da probabilidade condicional $\{r_j|r_i\}$**

Utilizando a regra de expansão outra vez:

$$\{r_j|r_i\} = \{r_j|r_iS\}\{S|r_i\} + \{r_j|r_iF\}\{F|r_i\}, \quad (\text{Equação 3.8})$$

e empregando o Teorema de Bayes<sup>40</sup>, pode-se reescrever as probabilidades  $\{S|r_i\}$  e  $\{F|r_i\}$ ,

$$\begin{aligned} \{S|r_i\} &= \frac{\{Sr_i\}}{\{r_i\}} \\ &= \frac{\{r_i|S\}\{S\}}{\{r_i\}}, \end{aligned} \quad e$$

substituindo  $\{r_i\}$  por Equação 3.7, chega-se

$$\{S|r_i\} = \frac{\{r_i|S\}\{S\}}{\{r_i|S\}\{S\} + \{r_i|F\}\{F\}}, \quad (\text{Equação 3.9})$$

e nota que

$$\{F|r_i\} = 1 - \{S|r_i\}. \quad (\text{Equação 3.10})$$

Substituindo-se a Equação 3.9 e a Equação 3.10 na Equação 3.8, obtém-se uma equação da  $\{r_j|r_i\}$  em função de  $s, f_1, f_2, g_1, g_2$  e duas novas probabilidades:  $\{r_j|r_iS\}$  e  $\{r_j|r_iF\}$ . Essas últimas duas probabilidades podem ser resumidas em uma:  $\{r_j|r_i r_3\}$ , onde  $r_3$  pode ser  $S$  ou  $F$ . Essas probabilidades representam as inter-relações entre os testes  $T_1$  e  $T_2$ , e vão ser analisadas em profundidade logo a seguir.

### ***Representação da probabilidade condicional $\{r_3|r_j r_i\}$***

Aplicando o Teorema de Bayes e a própria definição da probabilidade condicional repetitivamente, chega-se, então,

<sup>40</sup> Dados dois eventos A e B, o Teorema de Bayes estabelece a seguinte relação:  
 $\{B|A\} = \frac{\{A|B\}\{B\}}{\{A|B\}\{B\} + \{A|B'\}\{B'\}}$ ,  
 onde B' é o complemento do B (Clemen e Reilly, 2001, p. 256)

$$\begin{aligned}
\{r_3|r_j r_i\} &= \frac{\{r_j r_i|r_3\}\{r_3\}}{\{r_j r_i\}} \\
&= \frac{\{r_j|r_i r_3\}\{r_i|r_3\}\{r_3\}}{\{r_j r_i\}} \\
&= \frac{\{r_j|r_i r_3\}\{r_i|r_3\}\{r_3\}}{\sum_{\text{todos } r_3} \{r_j r_i|r_3\}\{r_3\}} \\
&= \frac{\{r_j|r_i r_3\}\{r_i|r_3\}\{r_3\}}{\sum_{\text{todos } r_3} \{r_j|r_i r_3\}\{r_i|r_3\}\{r_3\}}.
\end{aligned}$$

As probabilidades conhecidas na expressão acima são:

$$\begin{aligned}
\{r_3\} &= s \text{ ou } (1-s) \\
\{r_i|r_3\} &= f_i, g_i, (1-f_i) \text{ ou } (1-g_i), \text{ onde } i = 1 \text{ ou } 2.
\end{aligned}$$

Como no caso de  $\{r_j|r_i\}$ , aparecem, outra vez, as probabilidades  $\{r_j|r_i r_3\}$ . Uma vez sabendo-se como estimá-las, pode-se então calcular as probabilidades  $\{r_i\}$ ,  $\{r_j|r_i\}$  e  $\{r_3|r_j r_i\}$ , onde  $i = 1$  e  $j = 2$  ou  $i = 2$  e  $j = 1$ , em função dos parâmetros já conhecidos.

### ***Determinação da probabilidade condicional $\{r_i|r_j r_3\}$***

Dado que  $r_1$  pode assumir os estados “+” ou “-”,  $r_2$  pode assumir os estados “1” ou “0”, e  $r_3$  pode assumir os estados  $S$  ou  $F$ . As possíveis combinações de probabilidades  $\{r_i|r_j r_3\}$  são:  $\{1|+S\}$ ,  $\{1|-S\}$ ,  $\{+|1S\}$ ,  $\{+|0S\}$ ,  $\{1|+F\}$ ,  $\{1|-F\}$ ,  $\{+|1F\}$  e  $\{+|0F\}$ .

Não foram colocadas, na lista acima, as probabilidades como  $\{0|+S\}$  ou  $\{-|0F\}$ , pois são complementares às já incluídas. Isto é,

$$\begin{aligned}
\{0|+S\} &= 1 - \{1|+S\}, \text{ e} \\
\{-|0F\} &= 1 - \{+|0F\}.
\end{aligned}$$

Essas probabilidades podem ser interpretadas como uma confiabilidade condicionada ou uma atualização da confiabilidade de um teste, dada a informação sobre o resultado de outro teste. Por exemplo, a  $\{I|S\}$  é a confiabilidade do  $T_2$  ( $f_2$ ). A probabilidade  $\{I|+S\}$  é a probabilidade de obter o resultado “I”, dado que o resultado real do *design* é  $S$  e o resultado do  $T_1$  é “+”. Este resultado do  $T_1$  é a informação adicional em relação a  $S$ . Caso a observação do “+” aumentasse a chance de ocorrência do evento “I”, isto é,

$$\{I|+S\} > \{I|S\},$$

a confiabilidade condicionada é maior que a confiabilidade, então os dois testes imperfeitos são relacionados positivamente ou têm uma influência positiva. Caso os dois testes imperfeitos não sejam relacionados, isto é, o resultado de um não influencia o julgamento do projetista sobre o resultado do outro, tem-se a independência probabilística ou a inexistência de influência:

$$\{I|+S\} = \{I|S\}.$$

Demonstra-se, a seguir, que essas oito confiabilidades condicionadas  $\{r_j|r_i r_3\}$  são relacionadas entre si, e que, uma vez especificadas uma  $\{r_j|r_i S\}$  e uma  $\{r_j|r_i F\}$ , todas as outras são determinadas. Demonstra-se adicionalmente que a especificação dessas duas confiabilidades condicionadas caracteriza, juntamente com  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $g_1$  e  $g_2$ , completamente as relações entre  $T_1$  e  $T_2$  para o *design* em questão.

As relações entre essas oito confiabilidades condicionadas são obtidas através de formas alternativas de expansão da probabilidade conjunta dos três eventos incertos  $r_1$ ,  $r_2$  e  $r_3$ . Procurou sempre obter resultados de expansão em que as equações são expressas por parâmetros conhecidos como  $s$ ,  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $g_1$  e  $g_2$ .

Inicia-se com a interseção de três eventos  $r_1 = +$ ,  $r_2 = I$  e  $r_3 = S$ . Aplicando a própria definição de probabilidade condicional, obtêm-se duas expressões equivalentes da probabilidade conjunta  $\{+IS\}$ :

$$\begin{aligned} \{+IS\} &= \{I|+S\}\{+S\}, \text{ e} \\ \{+IS\} &= \{+|IS\}\{IS\}. \end{aligned}$$

Aplicando-se mais uma vez a definição da probabilidade condicional em  $\{+S\}$  e  $\{IS\}$ , chega-se:

$$\begin{aligned}\{+IS\} &= \{I|+S\}\{+|S\}\{S\}, \text{ e} \\ \{+IS\} &= \{+|IS\}\{I|S\}\{S\}.\end{aligned}$$

Finalmente, substituindo-se os símbolos de confiabilidade e observando-se que os termos  $\{S\} = s$  são cancelados, obtém-se

$$\{I|+S\}f_1 = \{+|IS\}f_2. \quad (\text{Equação 3.11})$$

A Equação 3.11 mostra a forma de relacionamento entre as confiabilidades condicionadas  $\{I|+S\}$  e  $\{+|IS\}$  e as confiabilidades  $f_1$  e  $f_2$ . Em seguida, apresenta-se a decomposição da probabilidade conjunta  $\{+OS\}$  utilizando-se o mesmo procedimento:

$$\begin{aligned}\{+OS\} &= \{O|+S\}\{+|S\}\{S\}, \text{ e} \\ \{+OS\} &= \{+|OS\}\{O|S\}\{S\}\end{aligned}$$

Como  $\{O|S\} = 1 - \{I|S\}$  e  $\{O|+S\} = 1 - \{I|+S\}$ , chega-se à seguinte expressão

$$(1 - \{I|+S\})f_1 = \{+|OS\}(1 - f_2) \quad (\text{Equação 3.12})$$

Analogamente, pode-se obter, decompondo-se  $\{I-S\}$ :

$$(1 - f_1)\{I|-S\} = f_2(1 - \{+|IS\}). \quad (\text{Equação 3.13})$$

Decompondo-se  $\{0-S\}$ :

$$(1 - f_1)(1 - \{I|-S\}) = (1 - f_2)(1 - \{+|OS\}). \quad (\text{Equação 3.14})$$

As próximas quatro equações são relacionadas a  $\{r_j, r_i, F\}$ , onde  $r_3 = F$ . Iniciando-se com  $\{1+F\}$ :

$$\begin{aligned}\{1+F\} &= \{+|1F\}\{+|F\}\{F\}, \text{ e} \\ \{1+F\} &= \{+|1F\}\{1|F\}\{F\}.\end{aligned}$$

Substituindo-se,

$$\begin{aligned}\{+|F\} &= 1 - \{-|F\} = 1 - g_1 \\ \{1|F\} &= 1 - \{0|F\} = 1 - g_2 \\ \{F\} &= (1 - s),\end{aligned}$$

Chega-se, então, a

$$\{1|+F\}(1 - g_1) = \{+|1F\}(1 - g_2) \quad \text{(Equação 3.15)}$$

Analogamente, pode-se obter, decompondo-se  $\{+0F\}$ :

$$(1 - g_1)(1 - \{1|+F\}) = g_2\{+|0F\} \quad \text{(Equação 3.16)}$$

Decompondo-se  $\{-1F\}$ :

$$g_1\{1|-F\} = (1 - g_2)(1 - \{+|1F\}) \quad \text{(Equação 3.17)}$$

Decompondo-se  $\{-0F\}$ :

$$g_1(1 - \{1|-F\}) = g_2(1 - \{+|0F\}) \quad \text{(Equação 3.18)}$$

Com a Equação 3.18, completou-se a identificação das oito equações (Equação 3.11 até Equação 3.18), envolvendo as confiabilidades condicionadas  $\{r_i | r_j, r_3\}$ . Para facilitar a

manipulação dessas oito equações, designa-se um símbolo para cada uma dessas confiabilidades condicionadas:

$$\{I|-S\} = a$$

$$\{+|IS\} = b$$

$$\{I|+S\} = c$$

$$\{+|0S\} = d$$

$$\{I|+F\} = e$$

$$\{+|IF\} = g$$

$$\{I|-F\} = h$$

$$\{+|0F\} = k$$

Substituindo-se esses símbolos nas Equações 3.11 até 3.18, obtém-se uma representação mais compacta das oito equações:

$$f_1 c = f_2 b \quad (\text{Equação 3.11})$$

$$f_1 (1 - c) = (1 - f_2) d \quad (\text{Equação 3.12})$$

$$(1 - f_1) a = f_2 (1 - b) \quad (\text{Equação 3.13})$$

$$(1 - f_1) (1 - a) = (1 - f_2) (1 - d) \quad (\text{Equação 3.14})$$

$$(1 - g_1) e = (1 - g_2) g \quad (\text{Equação 3.15})$$

$$(1 - g_1) (1 - e) = g_2 k \quad (\text{Equação 3.16})$$

$$g_1 h = (1 - g_2) (1 - g) \quad (\text{Equação 3.17})$$

$$g_1 (1 - h) = g_2 (1 - k) \quad (\text{Equação 3.18})$$

Aparentemente, são oito equações e oito incógnitas ( $a, b, c, d, e, g, h, k$ ). Uma observação mais atenta mostra que as incógnitas ( $a, b, c, d$ ) são envolvidas exclusivamente nas Equações 3.11 até 3.14, e as incógnitas ( $e, g, h, k$ ) são envolvidas exclusivamente nas Equações 3.15 até 3.18. Em outros termos, são dois sistemas de equações, cada um com quatro incógnitas e quatro equações.

Mostra-se, em primeiro lugar, que as quatro Equações 3.11, 3.12, 3.13 e 3.14 não são independentes, e, conseqüentemente, uma das quatro incógnitas tem que ser especificada de forma exógena para que as outras três possam ser calculadas. A partir da Equação 3.11, pode-se obter

$$c = \frac{f_2}{f_1} b,$$

substituindo-se o  $c$  da Equação 3.12, obtém-se:

$$f_1 \left[ 1 - \frac{f_2}{f_1} b \right] = (1 - f_2) d,$$

re-arranjando-se os termos:

$$f_1 - f_2 b = (1 - f_2) d$$

(Equação 3.19)

Agora, a partir da Equação 3.13, obtém-se:

$$a = \frac{f_2}{(1 - f_1)} (1 - b),$$

substituindo o  $a$ , da Equação 3.14, chega-se:

$$(1 - f_1) \left[ 1 - (1 - b) \left( \frac{f_2}{1 - f_1} \right) \right] = (1 - f_2) (1 - d),$$

re-arranjando-se:

$$f_1 - f_2 b = (1 - f_2) d$$

(Equação 3.20)

Nota-se que as Equações 3.19 e 3.20 derivam de equações diferentes, mas são idênticas. Isso significa que as quatro equações (Equações 3.11 até 3.14) não são independentes, e uma das probabilidades (incógnitas) tem que ser dada para que as outras sejam determinadas. Por exemplo, se  $b$  for determinado externamente, podem-se expressar as outras incógnitas em função desta:

$$\begin{aligned}
 a &= \left( \frac{f_2}{1-f_1} \right) (1-b) \\
 c &= \left( \frac{f_2}{f_1} \right) b \\
 d &= \frac{f_1 - f_2 b}{1-f_2}
 \end{aligned}$$

(Equação 3.21)

De uma forma similar, pode-se mostrar que o sistema de Equações 3.15 a 3.18 também não é independente e uma das probabilidades tem que ser dada externamente, para que as outras três sejam determinadas. Supondo-se que a probabilidade  $k = \{+|0F\}$  seja dada, pode-se, então, expressar as outras probabilidades em função da  $k$ .

$$\begin{aligned}
 e &= \frac{1-g_1-g_2k}{(1-g_1)} \\
 g &= \frac{1-g_1-g_2k}{(1-g_2)} \\
 h &= \frac{g_1-g_2(1-k)}{g_1}
 \end{aligned}$$

(Equação 3.22)

Resumindo o desenvolvimento realizado até este ponto, sobre confiabilidade condicionada  $\{r_j|r_i r_3\}$ , demonstrou-se que, além de especificar os parâmetros  $s, f_1, f_2, g_1$  e  $g_2$ , o projetista precisa fornecer estimativas sobre uma  $\{r_j|r_i S\}$  e uma  $\{r_j|r_i F\}$  para que todas as confiabilidades condicionadas  $\{r_j|r_i r_3\}$  sejam determinadas.

Para mostrar, de uma maneira intuitiva, a necessidade de especificar externamente as duas confiabilidades condicionadas  $\{r_j|r_i r_3\}$ , sendo uma com  $r_3 = S$  e outra com  $r_3 = F$ , apresentam-se a seguir duas situações em que os parâmetros  $s, f_1, f_2, g_1$  e  $g_2$  são idênticos, mas as confiabilidades condicionadas  $\{r_j|r_i r_3\}$  são distintas. Essas duas situações são mais bem visualizadas pelos respectivos diagramas Venn (Figuras 3.2 e 3.3).

Cada diagrama Venn contém cem células (100%), e cada uma representa 1% da área total. Desta maneira, torna-se viável a estimação visual de probabilidade, isto é, contando as

células do diagrama Venn. A linha tracejada<sup>41</sup> separa os semi-espços  $S$  e  $F$ , a linha pontilhada<sup>42</sup> separa os espaços “1” e “0” e a linha cheia separa “+” e “-”.

Nota-se que, para as duas situações representadas por seus diagramas Venn, os seguintes parâmetros são idênticos entre elas:

$$\begin{aligned} \{S\} &= s = 0,80 \\ \{+|S\} &= f_1 = 0,6 \\ \{1|S\} &= f_2 = 0,8 \\ \{-|F\} &= g_1 = 0,6 \\ \{0|F\} &= g_2 = 0,8 \end{aligned}$$

Entretanto, as confiabilidades condicionadas  $\{r_j|r_1r_3\}$  das duas situações são totalmente diferentes (veja a Tabela 3.2). Por exemplo, na Situação 1, a probabilidade de  $T_2$  obter um resultado “1”, dado  $S$ , aumentou de  $\{1|S\} = 0,8$  para  $\{1|+S\} = 1,0$ <sup>43</sup>, quando a informação adicional de que o  $T_1$  deu “+” é conhecida. Isso significa que os dois testes são relacionados positivamente: se o resultado de um teste for positivo, a chance de se obter um resultado favorável, no outro, aumenta. Por outro lado, se o resultado for negativo, a chance de se conseguir um resultado favorável no outro teste reduz-se. Isso pode ser observado na Tabela 3.2, quando o resultado do  $T_1$  for “-”, na Situação 1, a  $\{1|-S\}$  reduz-se para 0,50.

A Situação 2 representa uma condição na qual os dois testes são relacionados negativamente, isto é, um mau resultado de um indica que a chance de obter um resultado favorável no outro teste aumenta. Isso pode ser notado comparando-se a probabilidade  $\{1|S\} = 0,8$  com a confiabilidade condicionada  $\{1|-S\}$  que aumentou para 1,00.

<sup>41</sup> A linha tracejada das Figuras 3.2 e 3.3: - - - - -

<sup>42</sup> A linha pontilhada das Figuras 3.2 e 3.3: .....  
.....

<sup>43</sup> Essa probabilidade é medida visualmente na Figura 3.2, pois a interseção dos conjuntos  $S$  e “+” está contida dentro do conjunto “1”.

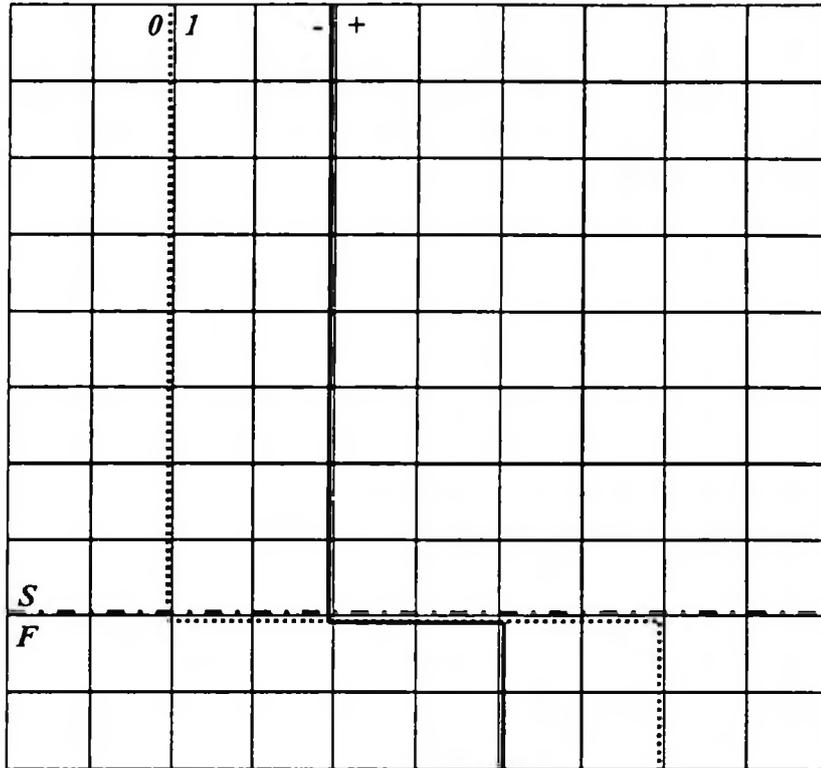


Figura 3.2 – Diagrama de Venn da Situação 1

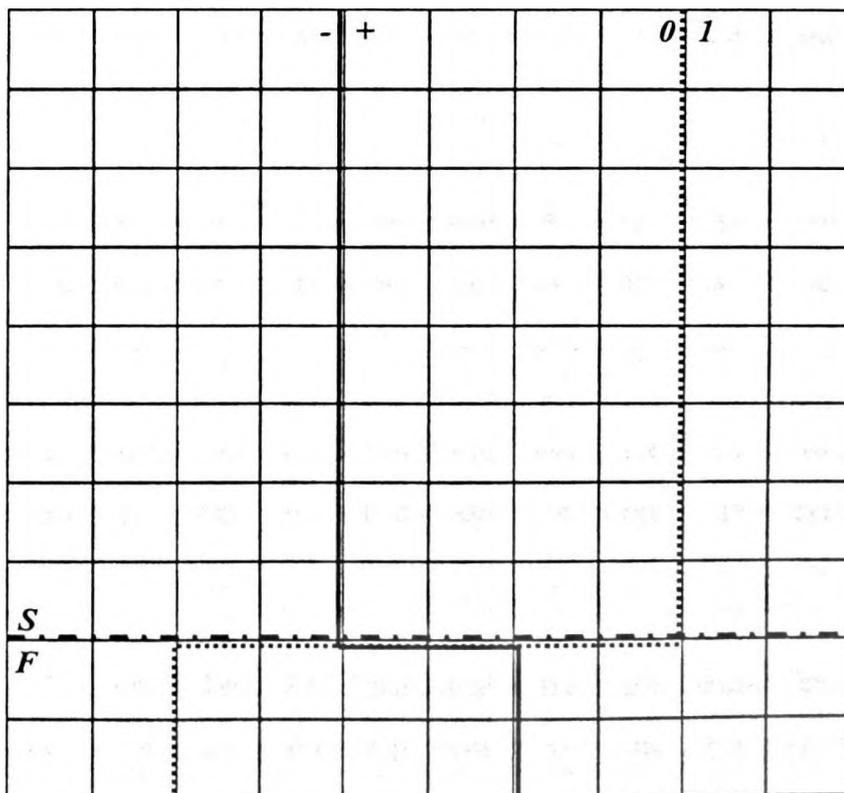


Figura 3.3 – Diagrama de Venn da Situação 2

Tabela 3.2 – Probabilidades  $\{r_i | r_j r_3\}$  das Duas Situações

Probabilidade $\{r_i   r_j r_3\}$		Valor da Probabilidade	
		Situação 1	Situação 2
a	$\{1   - S\}$	0,50	1,00
b	$\{+   1 S\}$	0,75	0,50
c	$\{1   + S\}$	1,00	0,80
d	$\{+   0 S\}$	0	1,00
e	$\{1   + F\}$	0,50	0
g	$\{+   1 F\}$	1,00	0
h	$\{1   - F\}$	0	0,33
k	$\{+   0 F\}$	0,25	0,50

### 3.5.3 – Estratégias de Testes e as Influências entre Testes

Para simplificar as anotações, designa-se que  $T_i = T_1$  e  $T_j = T_2$ . Como os teste diferem entre si pelos valores dos parâmetros ( $f_1, f_2, g_1, g_2$  e as duas confiabilidades condicionadas  $\{r_j | r_i r_3\}$ ), essa designação não prejudica a generalização dos resultados. Dez estratégias de testes são identificadas e os efeitos da alteração das influências, representadas pelas confiabilidades condicionadas, entre os dois testes imperfeitos, são analisados nesta Subsecção. As dez estratégias de testes não esgotam todas as possibilidades e são seleccionadas para mostrar os diferentes impactos de variações das confiabilidades condicionadas  $\{r_j | r_i r_3\}$  nos valores esperados das mesmas. A análise é realizada através de simulações de modelos desenvolvidos no computador e, portanto, algumas condições de testes, tais como a confiabilidade e a probabilidade, *a priori*, de sucesso, são assumidas.

As dez estratégias de teste incluem quatro estratégias sequenciais (Tabela 3.3), quatro estratégias paralelas (Tabela 3.4), a estratégia de lançamento direto sem realizar nenhum teste imperfeito e, finalmente, a estratégia de abandonar o projeto. Por exemplo, a estratégia sequencial S1, da Tabela 3.3, apresenta as seguintes regras de decisão: usar Teste 1 ( $T_1$ ) para avaliar o *design*. Se o resultado for “+”, lança-se o *design* (isto é, utiliza-se o teste perfeito); se o resultado for “-”, usa-se o Teste 2 ( $T_2$ ) para avaliar o *design*. Depois, lança-se o *design* se o resultado do  $T_2$  for “1” e abandona-se o projeto se o resultado do  $T_2$  for “0”. Como um exemplo da estratégia paralela, descrevem-se a seguir as regras de decisão da P4 (Tabela 3.4): a decisão inicial é usar os dois testes imperfeitos para avaliar o *design*. O lançamento só será

realizado se os dois resultados dos testes forem favoráveis: “+” e “1”. Qualquer outra combinação de resultados levará à decisão de abandonar.

**Tabela 3.3 – Estratégias Seqüenciais de Testes**

<i>Estratégia Seqüencial</i>	<i>Decisão Inicial</i>	<i>Resultado Inicial</i>	<i>Segunda Decisão</i>	<i>Resultado da 2ª decisão</i>	<i>Terceira Decisão</i>
<i>Seqüencial –1 (S1)</i>	Usa $T_1$	+	Lança		
		–	Usa $T_2$	1	Lança
				0	Abandona
<i>Seqüencial –2 (S2)</i>	Usa $T_1$	+	Usa $T_2$	1	Lança
				0	Abandona
		–	Usa $T_2$	1	Lança
				0	Abandona
<i>Seqüencial –3 (S3)</i>	Usa $T_1$	+	Usa $T_2$	1	Lança
				0	Abandona
		–	Abandona		
<i>Seqüencial –4 (S4)</i>	Usa $T_1$	+	Lança		
		–	Abandona		

**Tabela 3.4 – Estratégias Paralelas de Testes**

<i>Estratégia Paralela</i>	<i>Decisão Inicial</i>	<i>Resultado da decisão</i>	<i>Decisão subsequente</i>
<i>Paralela –1 (P1)</i>	Usa $T_1$ e $T_2$	+ e 1	Lança
		+ e 0	Lança
		– e 1	Lança
		– e 0	Abandona
<i>Paralela –2 (P2)</i>	Usa $T_1$ e $T_2$	+ e 1	Lança
		+ e 0	Lança
		– e 1	Abandona
		– e 0	Abandona
<i>Paralela –3 (P3)</i>	Usa $T_1$ e $T_2$	+ e 1	Lança
		+ e 0	Abandona
		– e 1	Lança
		– e 0	Abandona
<i>Paralela –4 (P4)</i>	Usa $T_1$ e $T_2$	+ e 1	Lança
		+ e 0	Abandona
		– e 1	Abandona
		– e 0	Abandona

A tarefa seguinte é a elaboração das equações do valor esperado dessas dez estratégias de testes. Essas equações são meios para a análise dos impactos da variação das influências (confiabilidades condicionadas) entre os testes imperfeitos. A equação de valor esperado da estratégia seqüencial S1,  $VE_{S1}$  (Equação 3.23), é composta de três componentes: o primeiro é o custo do Teste 1 ( $C_1$ ); o segundo envolve as conseqüências (custo de lançamento e possível retorno com o sucesso) da decisão de lançar o *design* com o resultado “+”, e o terceiro envolve as conseqüências de realizar o Teste 2 com o resultado “-”. O parâmetro  $\alpha$  é relacionado com a taxa de desconto de tempo:  $\alpha = 1/(1 + \text{taxa de desconto})$ .

$$VE_{S1} = -C_1 + \{+\} \left[ -C_1 \alpha^{t_1} + \{S|+\} R \alpha^{(t_1+t_1)} \right] \\ + \{-\} \left[ -C_2 \alpha^{t_1} + \{I|-\} \left( -C_1 \alpha^{(t_1+t_2)} + \{S|I-\} R \alpha^{(t_1+t_2+t_1)} \right) \right] \quad \text{(Equação 3.23)}$$

Analogamente, podem-se elaborar as outras equações de valor esperado das estratégias de testes que são apresentadas a seguir.

$$VE_{S2} = -C_1 - C_2 \alpha^{t_1} + \{I|+\} \{+\} \left( -C_1 \alpha^{(t_1+t_2)} + \{S|+I\} R \alpha^{(t_1+t_2+t_1)} \right) \\ + \{I|-\} \{-\} \left( -C_1 \alpha^{(t_1+t_2)} + \{S|I-\} R \alpha^{(t_1+t_2+t_1)} \right), \text{ ou} \\ VE_{S2} = -C_1 - C_2 \alpha^{t_1} - \{I\} C_1 \alpha^{(t_1+t_2)} + (\{+\} \{I|+\} \{S|+I\} + \{-\} \{I|-\} \{S|I-\}) R \alpha^{(t_1+t_2+t_1)} \quad \text{(Equação 3.24)}$$

$$VE_{S3} = -C_1 - \{+\} C_2 \alpha^{t_1} - \{+\} \{I|+\} C_1 \alpha^{(t_1+t_2)} + \{+\} \{I|+\} \{S|+I\} R \alpha^{(t_1+t_2+t_1)} \quad \text{(Equação 3.25)}$$

$$VE_{S4} = -C_1 + \{+\} \left( -C_1 \alpha^{t_1} + \{S|+\} R \alpha^{(t_1+t_1)} \right) \quad \text{(Equação 3.26)}$$

Nas estratégias paralelas, os dois testes imperfeitos são executados simultaneamente, portanto o prazo de realização dos testes é o maior prazo entre  $t_1$  e  $t_2$ , denomina-se, então,  $t_m = \max(t_1, t_2)$ .

As equações de valor esperado das estratégias paralelas são apresentadas a seguir:

$$VE_{P1} = -C_1 - C_2 - (1 - \{0\})C_1\alpha^{t_m} + (\{S\} - \{S0-\})R\alpha^{(t_m + t_l)} \quad (\text{Equação 3.27})$$

$$VE_{P2} = -C_1 - C_2 - \{+\}C_1\alpha^{t_m} + (\{+1\}\{S|+1\} + \{+0\}\{S|+0\})R\alpha^{(t_m + t_l)},$$

ou

$$VE_{P2} = -C_1 - C_2 + \{+\}C_1\alpha^{t_m} + \{+S\}R\alpha^{(t_m + t_l)} \quad (\text{Equação 3.28})$$

$$VE_{P3} = -C_1 - C_2 + \{+1\} \left( -C_1\alpha^{t_m} + \{S|+1\}R\alpha^{(t_m + t_l)} \right) + \{-1\} \left( -C_1\alpha^{t_m} + \{S|-1\}R\alpha^{(t_m + t_l)} \right) \quad (\text{Equação 3.29})$$

$$VE_{P4} = -C_1 - C_2 + \{+1\} \left( -C_1\alpha^{t_m} + \{S|+1\}R\alpha^{(t_m + t_l)} \right) \quad (\text{Equação 3.30})$$

As duas outras estratégias são: lançar diretamente (Ld) sem realizar nenhum teste imperfeito e abandonar o projeto (Ab). Os respectivos símbolos de valor esperado dessas estratégias são:  $VE_{Ld}$  e  $VE_{Ab}$ .

$$VE_{Ld} = -C_1 + \{S\}R\alpha^{t_l} \quad (\text{Equação 3.31})$$

$$VE_{Ab} = 0 \quad (\text{Equação 3.32})$$

Uma vez elaboradas as dez equações do valor esperado das estratégias de testes, a tarefa seguinte é analisar o impacto da mudança de influência entre os testes imperfeitos nesses valores esperados. Para tanto, assumiram-se os seguintes valores para os parâmetros do problema de teste:

$$\{S\} = s = 0,7$$

$$f_1 = g_1 = 0,6$$

$$f_2 = g_2 = 0,8$$

$$C_1 = C_2 = 0,01$$

$$C_l = 0,15$$

$$R = 1,0$$

Esses valores indicam que a chance de sucesso, *a priori*, *i* do *design* é 70% e o Teste 2 é mais confiável que o Teste 1. A suposição  $f_i = g_i$ ,  $i = 1$  ou  $2$  é uma simplificação para evitar a necessidade de definir várias confiabilidades. O retorno do sucesso ( $R$ ) é definido como  $1,0$  e os custos são medidos como uma fração do  $R$ . Desta maneira, fica mais conveniente comparar as diferentes combinações de custos e retorno do sucesso. Adicionalmente, assume-se que os prazos são desprezíveis ( $t_1 = t_2 = t_l = 0$ ). Os valores assumidos por esses parâmetros são arbitrários; alguns serão modificados para verificar seus efeitos nos valores esperados das estratégias de testes.

Em relação às influências entre os dois testes imperfeitos, os resultados da Subseção 3.4.2 indicam a necessidade de definir duas confiabilidades condicionadas  $\{r_i | r_j r_3\}$ . Para reduzir essa necessidade de definir duas confiabilidades condicionadas para uma, uma suposição adicional é adotada. Essa suposição assume uma certa simetria entre as confiabilidades condicionadas  $\{r_i | r_j r_3\}$ . Por exemplo, sabe-se que

$$\{+ | 1 S\} = b,$$

pela simetria, pode-se assumir

$$\{+ | 1 S\} = \{- | 0 F\}$$

(Equação 3.33)

Como

$$\{- | 0 F\} = 1 - \{+ | 0 F\},$$

e onde

$$\{+ | 0 F\} = k,$$

conclui-se que

$$b = 1 - k$$

(Equação 3.34)

A suposição da Equação 3.33 resultou no estabelecimento de uma relação entre  $b$  e  $k$  (Equação 3.34). Isso significa que, uma vez definido o valor da confiabilidade condicionada  $\{+ | 1 S\} = b$ , o valor da  $\{+ | 0 F\} = k$  é também determinado.

Como o tipo de influência entre os testes depende de uma comparação entre, por exemplo,  $\{+|S\}$  e  $\{+|I S\}$ , para facilitar essa comparação, define-se um novo parâmetro Beta ( $\beta$ ):

$$\beta = \{+|I S\} / \{+|S\}.$$

Quando o  $\beta$  for maior que um, a influência entre os dois testes é positiva. Quando o  $\beta$  for menor que um, a influência entre os dois testes é negativa. Finalmente, Quando o  $\beta$  for igual a um, os dois testes são independentes entre si.

Os resultados de simulação no computador estão na Figura 3.4 e na Figura 3.5. A Figura 3.5 difere da Figura 3.4 somente no valor da probabilidade  $\{S\} = s$ . O valor do  $\beta$  variou de 0,85 até 1,2, pois, nessa faixa, todas as confiabilidades condicionadas  $\{r_i | r_j r_3\}$  têm valores maior que zero e menor que um. As duas figuras mostram que os  $VE_{S1}$  e  $VE_{P1}$  decrescem com o aumento do  $\beta$  e a variação do valor esperado observado é um pouco menor que 0,1. A Figura 3.4 mostra que os  $VE_{S3}$  e  $VE_{P4}$  crescem linearmente com o aumento do  $\beta$  e a variação total do valor esperado observado é também um pouco menor que 0,1. Outros valores esperados,  $VE_{S2}$ ,  $VE_{S4}$ ,  $VE_{P2}$ ,  $VE_{P3}$  e  $VE_{Ld}$ , não são afetados pela variação do  $\beta$  (Figura 3.4).

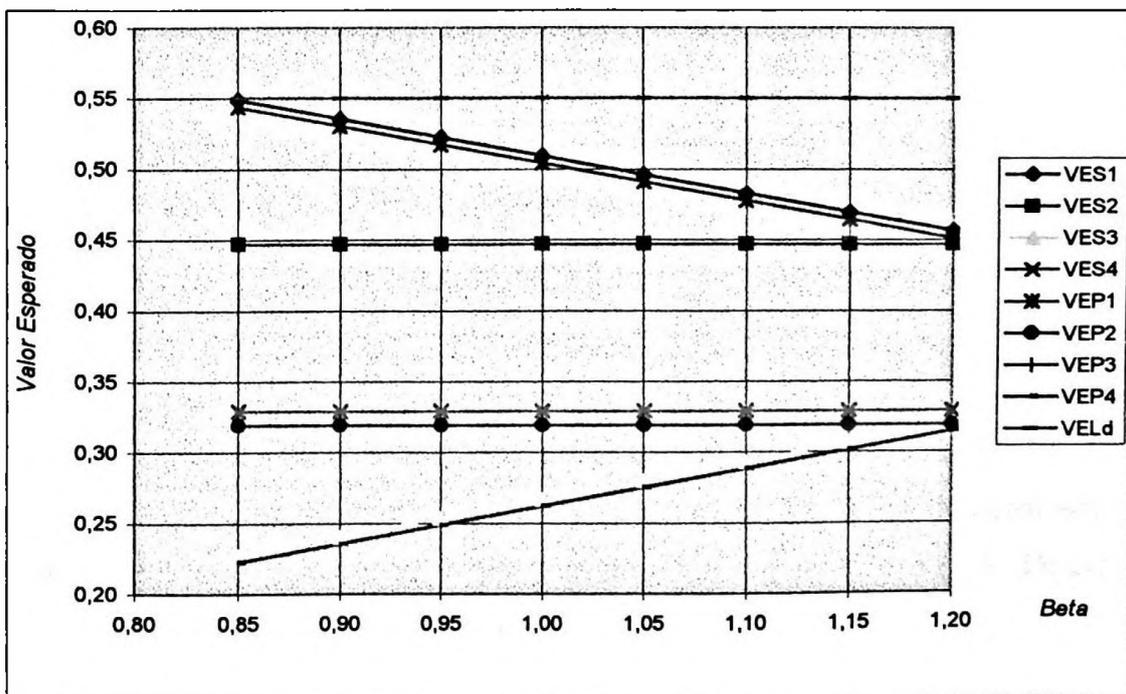
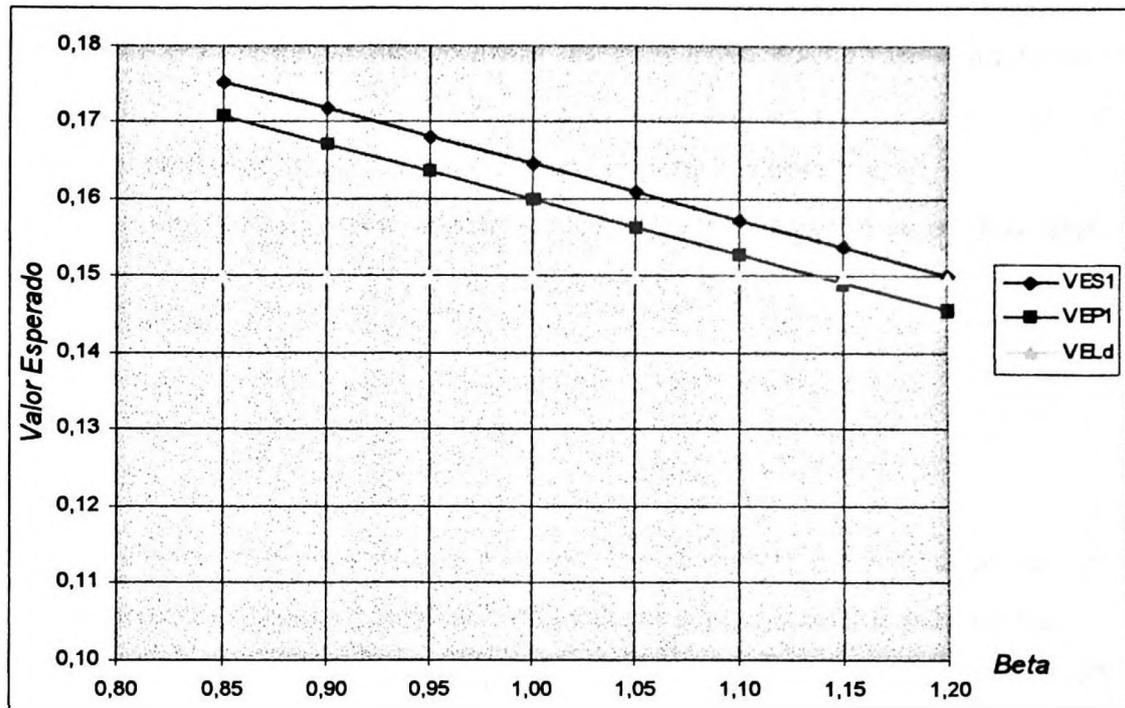


Figura 3.4 – Valor Esperado em Função do Beta ( $s = 0,7$ )



**Figura 3.5 – Valor Esperado em Função do Beta ( $s = 0,3$ )**

Para entender a razão pela qual o  $VE_{SI}$  decresce com um aumento do  $\beta$ , uma pista é analisar o componente que contém o  $R$  na equação do  $VE_{SI}$  (Equação 3.23):

$$\{-\}\{I|-\}\{S|I-\}R\alpha^{(t_1+t_2+t_1)}$$

As três probabilidades podem ser re-arranjadas:

$$\{-\}\{I|-\}\{S|I-\} = \{-|IS\}\{I|S\}\{S\} = (1 - \{+|IS\})f_2s = (1 - b)f_2s$$

O último arranjo das três probabilidades mostra claramente que um aumento do  $b$  reduzirá o componente que contém  $R$ . Como o valor do  $R$  geralmente domina os valores de custos, o  $VE_{SI}$  provavelmente diminuirá com um aumento do  $b$ . Uma demonstração mais completa desta relação é determinar a derivada do  $VE_{SI}$  em relação ao  $b$ . Derivando a Equação 3.23 em relação ao  $b$ , o resultado é:

$$\frac{dVE_{SI}}{db} = C_1(f_2 + f_1(1-s)) - f_2sR\alpha^{t_1} \alpha^{(t_1+t_2)}$$

(Equação 3.35)

Substituindo os valores dos parâmetros ( $s = 0,7$ ;  $f_1 = g_1 = 0,6$ ;  $f_2 = g_2 = 0,8$ ;  $C_1 = C_2 = 0,01$ ;  $C_l = 0,15$  e  $R = 1,0$ ) na derivada acima, verifica-se que a mesma é positiva e constante, portanto o  $VE_{S_l}$  é uma função linear do  $b$ . A Equação 3.35 mostra adicionalmente que essa derivada pode não ser sempre negativa. É relativamente fácil verificar que, para um  $C_l$  alto e uma probabilidade  $s$  pequena, a derivada poderia ser positiva.

Utilizando um procedimento similar, pode-se entender a razão de o  $VE_{P_4}$  crescer com um aumento do  $b$ . A derivada do  $VE_{P_4}$ , em relação ao  $b$ , é:

$$\frac{dVE_{P_4}}{db} = (sR\alpha^{t_l} - C_l)f_2\alpha^{t_m}$$

Para os valores assumidos dos parâmetros, essa derivada é positiva. Nota-se também que a mesma pode ser negativa, dependendo dos valores específicos dos parâmetros.

Finalmente, analisam-se as razões pelas quais os  $VE_{S_2}$ ,  $VE_{S_4}$ ,  $VE_{P_2}$ ,  $VE_{P_3}$  e  $VE_{L_d}$  não são afetado pela variação do  $\beta$ . Em primeiro lugar, analisando-se as equações de  $VE_{S_4}$ ,  $VE_{P_2}$  e  $VE_{L_d}$  (Equações 3.26, 3.28 e 3.31 respectivamente), verifica-se que nenhuma equação possui probabilidades envolvendo os três eventos  $r_1$ ,  $r_2$  e  $r_3$  simultaneamente. Isto significa que essas estratégias não dependem das influências entre os dois testes imperfeitos e, portanto, seus valores esperados se mantem constantes nas Figuras 3.4 e 3.5.

Em segundo lugar, analisam-se os  $VE_{S_2}$  e  $VE_{P_3}$ . Comparando as respectivas equações de valor esperado (Equações 3.24 e 3.29), percebe-se que elas possuem probabilidades idênticas. Utilizando a equação do  $VE_{P_3}$  como exemplo, demonstra-se a seguir que esta equação é independente dos parâmetros de influência (confiabilidades condicionadas) entre os testes imperfeitos.

A equação do  $VE_{P_3}$  (Equação 3.29) pode ser re-arranjada sucessivamente, como se mostra a seguir:

$$\begin{aligned} VE_{P_3} &= -C - C_l + \{+1\} \left( -C_l \alpha^{t_m} + \{S|+1\} R \alpha^{(t_m+t_l)} \right) + \{-1\} \left( -C_l \alpha^{t_m} + \{S|-1\} R \alpha^{(t_m+t_l)} \right) \\ VE_{P_3} &= -C - C_l - (\{+1\} + \{-1\}) C_l \alpha^{t_m} + (\{+1\} \{S|+1\} + \{-1\} \{S|-1\}) R \alpha^{(t_m+t_l)} \\ VE_{P_3} &= -C - C_l - \{1\} C_l \alpha^{t_m} + \{1S\} R \alpha^{(t_m+t_l)} \end{aligned}$$

A última equação do  $VE_{P_3}$  acima não apresenta nenhuma probabilidade que envolva os três eventos  $r_1$ ,  $r_2$  e  $r_3$ , portanto, foi demonstrado que o  $VE_{P_3}$  independe da variação do  $\beta$ .

### 3.6 – Síntese e Conclusões do Capítulo

Este Capítulo apresenta três formulações, ou modelos, do problema de teste com uma única alternativa de *design*: a primeira formulação conta com um único teste perfeito; a segunda conta com dois testes, sendo um perfeito; e a terceira conta com três testes, sendo dois imperfeitos. As duas formulações iniciais introduzem a terminologia, a estrutura matemática básica dos modelos e o critério de determinação da estratégia ótima de teste. Estes dois modelos simples já mostram que a estratégia ótima depende fundamentalmente das relações entre o custo do teste perfeito ( $C$ ), a receita do sucesso ( $R$ ) e a probabilidade *a priori* de sucesso do projeto ( $\{ S \}$ ). No modelo mais complexo do Capítulo 4, esses mesmos parâmetros, devidamente modificados, são também determinantes da estratégia ótima de teste. A análise do modelo com três testes, da Subseção 3.4, permite identificar um novo tipo de probabilidade denominada de confiabilidade condicionada  $\{r_i | r_j r_3\}$ . A confiabilidade condicionada é uma medida da influência do resultado de um teste sobre o de outro, para o mesmo *design*. Essa influência pode ser positiva ou negativa, dependendo da relação entre os dois testes. Ela permite a atualização do conhecimento sobre os possíveis resultados de um teste, a partir do resultado observado de outro teste. É demonstrado que se dois testes são relacionados, então duas confiabilidades condicionadas devem ser especificadas, além da probabilidade *a priori* de sucesso, as duas confiabilidades, os custos e retornos, para viabilizar a solução do problema de testes. É também mostrada, neste capítulo, que a relação entre o valor esperado de uma estratégia de teste e a confiabilidade condicionada é linear, e, dependendo dos valores dos parâmetros do problema, um aumento da confiabilidade condicionada pode resultar em um crescimento, uma diminuição, ou até uma manutenção do valor esperado da estratégia de teste.

## **CAPÍTULO 4**

### **PROBLEMA DE TESTE COM DUAS ALTERNATIVAS DE *DESIGN***

#### 4.1 – Introdução ao Problema

Este capítulo trata do problema dos testes com duas alternativas de *design*, além da alternativa de conviver com o problema, ou de abandoná-lo, e, também, de dois tipos de testes, sendo um perfeito. O projetista precisa, então, selecionar a melhor alternativa de *design*, utilizando esses dois testes, de maneira a otimizar o desempenho do projeto, pois, além dos custo e da confiabilidade, cada teste é caracterizado também pelo seu prazo de execução. Pretende-se mostrar, através do modelo, em primeiro lugar, como incorporar formalmente a dependência probabilística entre as alternativas de *design* na análise das estratégias de experimentação e, em segundo lugar, como este modelo pode ser usado para entender a influência dos parâmetros chaves, tais como os custos e a confiabilidade, nas estratégias de teste.

Apresentam-se, inicialmente, os parâmetros e seus símbolos de representação:

As duas opções de *designs* concorrentes são denominadas de  $O_1$  e  $O_2$ . Denomina-se  $r_i$  como o resultado de teste imperfeito no *design*  $O_i$ ; em que  $i = 1$  ou  $2$ , e  $r_i$  pode assumir dois estados:  $+_i$  ou  $-_i$ . Os custos e os prazos para realizar o teste imperfeito para cada *design* são:

$C_i$  = custo de realizar teste no  $O_i$ ;  $i = 1$  ou  $2$ , e

$t_i$  = prazo para realizar teste no  $O_i$ ;  $i = 1$  ou  $2$ .

O custo e o prazo do teste perfeito são, respectivamente,  $C_l$  e  $t_l$ . O teste perfeito representativo utilizado nesta Seção é o lançamento comercial do *design* escolhido, portanto, o símbolo “ $l$ ”.

Os resultados reais de cada alternativa de *design* são  $S_i$  (sucesso) ou  $F_i$  (fracasso),  $i = 1$  ou  $2$ . Este sucesso, ou fracasso, só será observado depois de executado o teste perfeito, que pode ser, por exemplo, o lançamento da alternativa de *design* no mercado. A recompensa do “sucesso” é uma receita  $R$ , que independe da alternativa de *design*. Neste Capítulo, a receita do “fracasso” é zero, isto é  $r = 0$ .

A confiabilidade do teste imperfeito é caracterizada pelos seguintes parâmetros:

$$f_i = \{+_i | S_i\}; \quad i = 1 \text{ ou } 2$$

$$g_i = \{-_i | F_i\}; \quad i = 1 \text{ ou } 2$$

Essas definições permitem que o mesmo teste possa ter confiabilidade diferente, dependendo da alternativa a ser testada. Mas, para evitar a complexidade e sem perder o foco, o modelo a ser desenvolvido assume que a confiabilidade é a mesma para as duas opções de *design*, e assume, adicionalmente, que  $f = g$ . Esses parâmetros de confiabilidade são conhecidos pelo projetista antes de iniciar o esforço de resolução do problema em questão.

Esse problema de teste enfrentado pelo projetista pode ser representado por uma árvore de decisão (Figura 4.1). As seis alternativas decisórias iniciais, do ponto de decisão  $\underline{U}$  da Figura 4.1, são: lança  $O_1$ , lança  $O_2$ , testa  $O_1$ , testa  $O_2$ , testa  $O_1$  e  $O_2$ , e abandona. Cada uma dessas decisões envolve eventos (incertezas e decisões) subseqüentes. Entretanto, como o problema atual é mais complexo, vários pontos de incerteza e de decisão não são detalhados para economizar o espaço. Esses pontos têm estruturas similares aos já detalhados na Figura 4.1. Os pontos de decisão  $\underline{W}_2$  (subseqüentes ao ponto  $\underline{V}_1$ ),  $\underline{W}_3$  e  $\underline{W}_4$  (subseqüentes ao ponto  $\underline{V}_2$ , mas que não são mostrados) possuem as mesmas alternativas decisórias que o ponto de decisão  $\underline{W}_1$ , detalhado na Figura 4.1, e as diferenças estão nas probabilidades condicionais  $\{S_k | r_i r_j\}$ . O mesmo ocorre com os pontos de decisão  $\underline{Y}_2$  e  $\underline{Y}_4$  (subseqüentes ao ponto  $\underline{U}$ , mas não mostrados) em relação aos pontos  $\underline{Y}_1$  e  $\underline{Y}_3$ .

A árvore de decisão da Figura 4.1 é similar às do Capítulo anterior. Por exemplo, na seqüência de pontos de decisão  $\underline{U}$ ,  $\underline{V}_1$  e  $\underline{W}_1$ , o projetista testa  $O_i$ , que deu resultado “+ $i$ ”; depois ele opta por testar  $O_j$ , no ponto  $\underline{V}_1$ , que deu “+ $j$ ”; e agora precisa decidir, no ponto  $\underline{W}_1$ , entre lançar  $O_1$ ,  $O_2$  ou abandonar. Entretanto, esta árvore incorpora várias novas probabilidades condicionais, tais como  $\{S_2 | F_1\}$ ,  $\{+2 | -1\}$  e  $\{S_2 | -1 +2\}$ . A probabilidade  $\{S_2 | F_1\}$  é a chance do sucesso de  $O_2$ , dado que o  $O_1$  foi um fracasso. A probabilidade  $\{+2 | -1\}$  representa a estimativa do projetista sobre a chance de obter um resultado “positivo” do *design*  $O_2$ , dado que o resultado de teste do  $O_1$  foi “negativo”. O projetista precisa realizar essa estimativa quando for tomar a decisão no ponto  $\underline{V}_2$ . A probabilidade  $\{S_2 | -1 +2\}$  representa a estimativa do projetista sobre a chance de sucesso do *design*  $O_2$ , dado que os resultados dos testes deram “negativo” para  $O_1$  e “positivo” para  $O_2$ . Esse cálculo é necessário, por exemplo, no ponto de decisão  $\underline{W}_2$ .

Com duas opções de *design* e dois tipos de testes, as possíveis estratégias de testes são muitas. As principais são agrupadas em quatro classes, de acordo com a decisão inicial no ponto  $\underline{U}$ :

1. Lançar um *design* (usando o teste perfeito); se o resultado for o fracasso, lança outro ou abandona;
2. Avaliar um *design* usando o teste imperfeito; o resultado pode ser “positivo” (+) ou “negativo” (-). Observando esse resultado, o projetista pode escolher entre lançar o *design* (usando o teste perfeito); avaliar outro, com teste imperfeito; ou abandonar;
3. Avaliar os dois *designs*, com teste imperfeito, em paralelo; dependendo dos resultados, lançar um ou abandonar; ou
4. Abandonar o projeto.

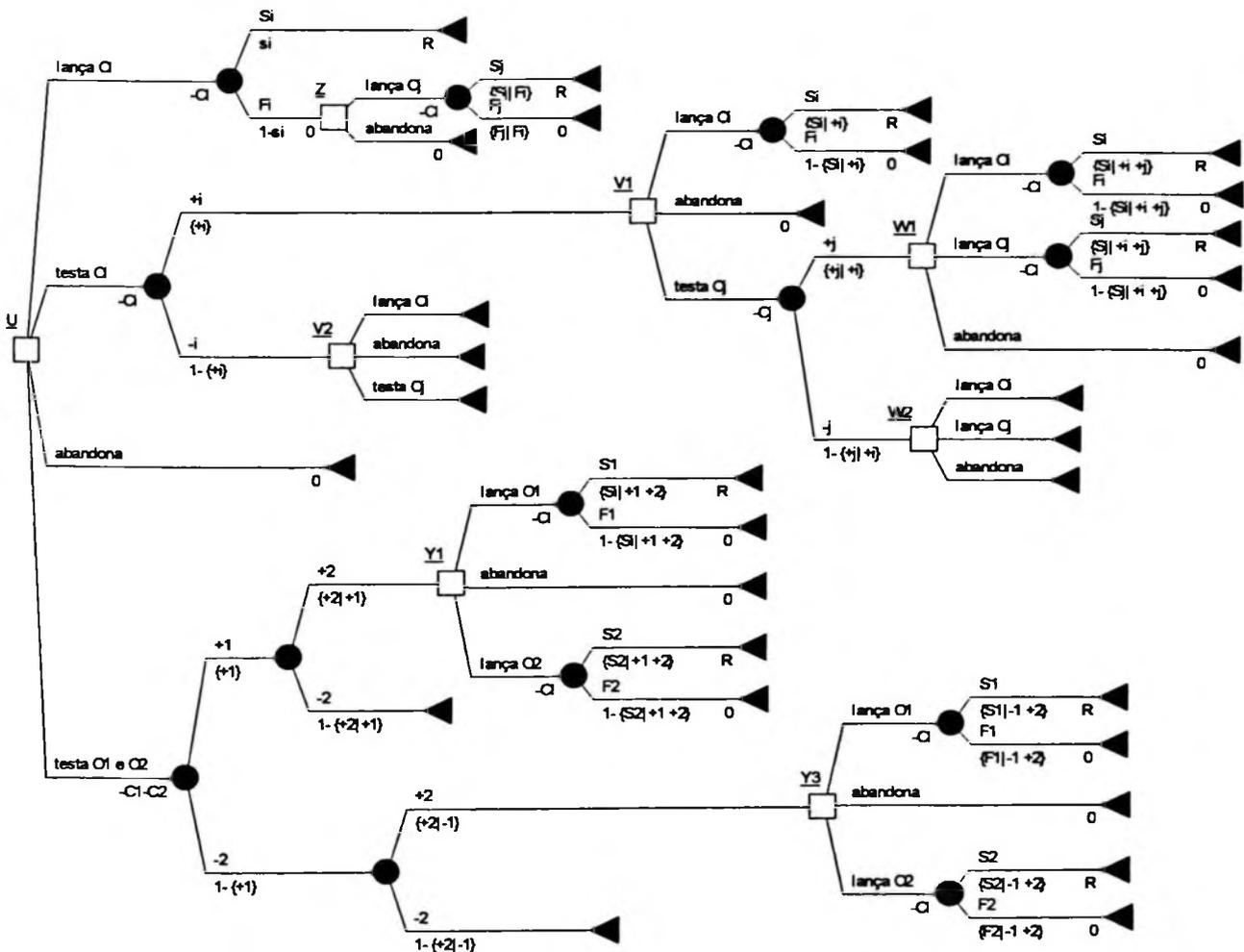


Figura 4.1 – Árvore de Decisão do Problema com Dois *Designs* e Dois Testes

As duas primeiras (1 e 2) são estratégias de testes seqüenciais e a terceira é a estratégia de teste paralelo. Nota-se que a estratégia de lançar os dois *designs* em paralelo não é considerada neste modelo, pois se supõe que só é possível lançar um *design* em cada momento. A Tabela 4.1 descreve algumas estratégias de cada uma das três primeiras classes

acima. Por exemplo, a estratégia Lseq-2 lança o *design*  $O_i$ ; se for um fracasso, abandona o projeto. Nota-se que esta tabela não esgota todas as possibilidades.

O projetista procura escolher uma estratégia que lhe dará maior lucro, mais especificamente, maior valor presente esperado de lucro. Em cada ponto de decisão, o projetista observa os resultados dos testes realizados, atualiza seu conhecimento sobre os possíveis eventos no futuro, e toma uma melhor decisão sob incerteza.

**Tabela 4.1 – Estratégias de Teste**

<b>1. Lançamento Sequencial</b>	<b>Decisão no <math>U</math></b>	<b>Resultado da decisão no <math>U</math></b>	<b>Decisão no <math>Z</math></b>
LSeq-1	Lança $O_i$	Sucesso	
		Fracasso	Lança $O_j$
LSeq-2	Lança $O_i$	Sucesso	
		Fracasso	Abandona

<b>2. Teste Sequencial</b>	<b>Decisão no <math>U</math></b>	<b>Resultado da decisão no <math>U</math></b>	<b>Decisão no <math>V</math></b>	<b>Resultados da decisão no <math>V</math></b>	<b>Decisão no <math>W</math></b>
TSeq-1	Testa $O_i$	$+_i$	Lança $O_i$		
		$-_i$	Testa $O_j$	$+_j$	Lança $O_i$
TSeq-2	Testa $O_i$	$+_i$	Testa $O_j$	$+_j$	Lança $O_i$ ou $O_j$
				$-_j$	Lança $O_i$
		$-_i$	Testa $O_j$	$+_j$	Lança $O_i$
				$-_j$	Abandona
TSeq-3	Testa $O_i$	$+_i$	Lança $O_i$		
		$-_i$	Abandona		
TSeq-4	Testa $O_i$	$+_i$	Abandona		
		$-_i$	Abandona		

<b>3. Testes em paralelo</b>	<b>Decisão no <math>U</math></b>	<b>Resultado da decisão no <math>U</math></b>	<b>Decisão no <math>Y</math></b>
TPar-1	Testa $O_i$ e $O_j$	$+_i$ e $+_j$	Lança $O_i$ ou $O_j$
		$+_i$ e $-_j$	Lança $O_i$
		$-_i$ e $+_j$	Lança $O_j$
		$-_i$ e $-_j$	Abandona
TPar-2	Testa $O_i$ e $O_j$	$+_i$ e $+_j$	Lança $O_i$ ou $O_j$
		$+_i$ e $-_j$	Abandona
		$-_i$ e $+_j$	Abandona
		$-_i$ e $-_j$	Abandona
TPar-3	Testa $O_i$ e $O_j$	$+_i$ e $+_j$	Lança $O_i$ ou $O_j$
		$+_i$ e $-_j$	Lança $O_i$
		$-_i$ e $+_j$	Abandona
		$-_i$ e $-_j$	Abandona

Obs.: Os pontos de decisão  $U$ ,  $V$ ,  $W$ ,  $Y$  e  $Z$  são da árvore da Figura 4.1

O cálculo do valor presente esperado de cada estratégia, exige o emprego das probabilidades, inclusive as novas, como  $\{S_2 | F_1\}$ ,  $\{+2 | -1\}$  e  $\{S_2 | -1 +2\}$ , que precisam ser decompostas em função dos parâmetros conhecidos ( $f, s_1, e, s_2$ ). A próxima Seção é dedicada a essa tarefa e à análise das relações entre essas probabilidades.

## 4.2 – Probabilidades e suas Inter-relações

A parte inicial dessa Seção apresenta a decomposição das probabilidades condicionais chaves, encontradas na árvore de decisão da Figura 4.1, em função dos parâmetros conhecidos, tais como a confiabilidade e as probabilidades *a priori* de sucesso dos *designs*. Esse esforço redundará na identificação de um novo tipo de parâmetros, tais como  $\{S_1 | S_2\}$  e  $\{S_2 | F_1\}$ , que representam a influência entre as duas alternativas de *design*. Vários exemplos são elaborados para obter um entendimento mais intuitivo sobre esses parâmetros. A parte final desta Seção dedica-se à análise das relações entre as probabilidades condicionais; essas relações são importantes para derivar as estratégias ótimas de testes na próxima Seção. Os resultados dessa análise mostram que os novos parâmetros,  $\{S_1 | S_2\}$  e  $\{S_2 | F_1\}$ , são fatores determinantes das relações entre as probabilidades condicionadas, e portanto exercem influência na definição da estratégia ótima de teste.

### 4.2.1 – Decomposição das Probabilidades $\{r_i | r_j\}$ e $\{S_i | r_i r_j\}$

As probabilidades condicionais  $\{r_i | r_j\}$  e  $\{S_i | r_i r_j\}$  são encontradas nos pontos de incerteza subseqüentes às decisões de execução de testes na árvore de decisão (Figura 3.4-1). Um dos resultados de decompor as probabilidades  $\{r_i | r_j\}$  e  $\{S_i | r_i r_j\}$  é mostrar que a nova probabilidade do tipo  $\{S_i | S_j\}$  deve ser tratada como um dos parâmetros fundamentais em problemas de testes.

O procedimento de decomposição da  $\{r_i | r_j\}$  é similar ao realizado na Seção 3.4, do Capítulo 3. A diferença com a derivação da Seção 3.4 está no número de alternativas de projeto: o problema atual conta com dois *designs*, portanto, cuidados devem ser tomados para distinguir, por exemplo,  $S_i$  e  $F_j$ . Começando com a decomposição da  $\{r_i | r_j\}$ , expandindo-a em relação a  $S_i$  e  $F_i$ :

$$\{r_i | r_j\} = \{r_i | S_i r_j\} \{S_i | r_j\} + \{r_i | F_i r_j\} \{F_i | r_j\}$$

(Equação 4.1)

Essa equação é construída por dois tipos de probabilidade; o primeiro é do tipo  $\{S_i | r_j\}$ ; e o segundo é composto por  $\{r_i | S_i r_j\}$  e  $\{r_i | F_i r_j\}$ . Decompondo primeiro as do tipo  $\{S_i | r_j\}$ , usando o Teorema de Bayes, pode-se escrever

$$\{S_i | r_j\} = \frac{\{r_j | S_i\} \{S_i\}}{\{r_j\}}$$

(Equação 4.2)

e expandindo  $\{r_j | S_i\}$ , em relação ao  $S_j$ , resulta em

$$\{r_j | S_i\} = \{r_j | S_j S_i\} \{S_j | S_i\} + \{r_j | F_j S_i\} \{F_j | S_i\}$$

(Equação 4.3)

Supondo que:

$$\begin{aligned} \{r_j | S_j S_i\} &= \{r_j | S_j\}, \\ \{r_j | F_j S_i\} &= \{r_j | F_j\}, \\ \{r_j | S_j r_i\} &= \{r_i | S_j\}, \\ \text{e } \{r_j | F_j r_i\} &= \{r_j | F_j\}. \end{aligned}$$

(Equação 4.4)

Essa suposição da Equação 4.4 é muito importante. Uma compreensão mais intuitiva e as implicações dessa suposição são discutidas logo em seguida. Utilizando essa suposição, a Equação 4.3 pode ser simplificada para:

$$\{r_j | S_i\} = \{r_j | S_j\} \{S_j | S_i\} + \{r_j | F_j\} \{F_j | S_i\}$$

(Equação 4.5)

Pode-se também expandir a  $\{r_j\}$  da Equação 4.2:

$$\{r_j\} = \{r_j | S_j\} \{S_j\} + \{r_j | F_j\} \{F_j\}$$

(Equação 4.6)

Nota-se que as Equações 4.5 e 4.6 dependem, em primeiro lugar, de parâmetros já conhecidos pelo projetista: probabilidade *a priori* de sucesso de *designs*,  $S_j$ , e desempenhos do teste,  $\{r_j | S_j\}$  e  $\{r_j | F_j\}$ , e em segundo lugar, de novos parâmetros do tipo  $\{S_i | S_j\}$  ou  $\{F_i | S_j\}$ . As probabilidades condicionais  $\{S_i | S_j\}$  ou  $\{F_i | F_j\}$  representam as dependências entre os *designs*, e são denominadas, neste trabalho, de influências entre os designs. Uma exploração do seu significado e das suas implicações é realizada ainda neste capítulo. Juntamente com os parâmetros  $\{S_i\}$  e  $\{r_i | S_i\}$ , são conhecimentos, *a priori* que o projetista deve possuir sobre o projeto.

Conseqüentemente, as  $\{S_i | r_j\}$  da Equação 4.2 podem ser estimadas a partir da Equação 4.5 e Equação 4.6.

As probabilidades do segundo tipo, as  $\{r_i | S_i r_j\}$  e  $\{r_i | F_i r_j\}$  na Equação 4.1, podem ser simplificadas, aplicando-se diretamente as suposições da Equação 4.4:

$$\{r_i | S_i r_j\} = \{r_i | S_i\} \text{ e } \{r_i | F_i r_j\} = \{r_i | F_i\}.$$

(Equação 4.7)

As probabilidades  $\{r_i | S_i\}$  e  $\{r_i | F_i\}$  são as confiabilidades de teste, portanto, parâmetros conhecidos pelo projetista.

Substituindo as Equações 4.2, 4.5, 4.6 e 4.7, na Equação 4.1, obtém-se, então, a  $\{r_i | r_j\}$  em função de parâmetros conhecidos pelo projetista.

Uma vez derivada a  $\{r_i | r_j\}$ , a próxima tarefa é decompor a  $\{S_i | r_i r_j\}$ . Aplicando-se a definição da probabilidade condicional sucessivamente, resulta, em primeiro passo,

$$\{S_i | r_i r_j\} = \frac{\{r_i r_j S_i\}}{\{r_i r_j\}}$$

e, em segundo passo,

$$\{S_i | r_i r_j\} = \frac{\{r_i | r_j S_i\} \{r_j S_i\}}{\{r_i | r_j\} \{r_j\}}$$

Utilizando a suposição da Equação 4.4, esta expressão pode ser simplificada para

$$\{S_i|r_i r_j\} = \frac{\{r_i|S_i\} \{r_j|S_i\} \{S_i\}}{\{r_i|r_j\} \{r_j\}}$$

(Equação 4.8)

A equação acima mostra que os componentes da  $\{S_i|r_i r_j\}$  são probabilidades já conhecidas pelo projetista: a  $\{r_j|S_i\}$  é estimada pela Equação 4.5, a  $\{r_i|r_j\}$  é estimada pela Equação 4.1 e a  $\{r_j\}$  é estimada pela Equação 4.6.

Conclui-se, neste ponto, a decomposição das probabilidades  $\{r_i|r_j\}$  e  $\{S_i|r_i r_j\}$ . Dois aspectos, entretanto, devem ser destacados nesse procedimento de decomposição: a importância da suposição representada pela Equação 4.4 e a identificação de probabilidades condicionais do tipo  $\{S_i|S_j\}$  ou  $\{S_i|F_j\}$ , denominadas de influências entre os *designs*, como parâmetros fundamentais e conhecidos pelo projetista. Dada a sua importância, esses dois aspectos são estudados em mais profundidade ainda nesta Seção.

#### 4.2.2 – As Implicações das Suposições da Equação 4.4

As suposições contidas na Equação 4.4 são cruciais para simplificar o modelo matemático. Essas suposições afirmam que a chance de observar o resultado  $r_j$  de teste do *design*  $O_j$ , quando o resultado real do  $O_j$  é disponível, depende somente deste último e não de resultado real ou de teste observado de outro *design*.

Uma analogia com um problema simples da medicina pode ser usada para mostrar que essas suposições são muito razoáveis. Se uma pessoa ( $O_j$ ) não tiver a doença ( $S_j$ ), então a chance de obter um resultado de teste diagnóstico positivo ( $r_j = +_j$ ) deve ser independente do fato de uma outra pessoa ( $O_i$ ) não ter a doença ( $S_i$ ).

É importante distinguir a suposição da Equação 4.4 com as confiabilidades condicionadas da Seção 3.4, do Capítulo 3. A Seção 3.4 trata do problema com um único *design* e três testes, sendo um perfeito e dois imperfeitos. As confiabilidades condicionadas são probabilidades do tipo  $\{r_j|r_i r_3\}$ , onde  $r_3$  pode ser  $S$  (sucesso do único *design* em questão) ou  $F$ , portanto, muito similares às probabilidades condicionais da Equação 4.4. Para ilustrar melhor o significado da  $\{r_j|r_i r_3\}$  do Capítulo 3, suponha-se que “+” é o resultado do Teste 1

$(T_1)$  e “ $I$ ” é o do Teste 2 ( $T_2$ ), realizados no mesmo design, então, a confiabilidade condicionada é

$$\{r_j | r_i r_3\} = \{I | +S\}$$

e esta é a probabilidade de obter resultado “ $I$ ”, dado que o resultado do Teste 1 foi “ $+$ ” e o *design* teve sucesso. É importante notar que, no modelo da Seção 3.4, os dois testes são realizados no mesmo *design*, portanto não é razoável supor que

$$\{I | +S\} = \{I | S\}$$

como na Equação 4.4. Utilizando outra vez um exemplo da medicina, a informação “ $+$ ” pode ser o resultado de exame de sangue do paciente e o evento “ $I$ ” pode ser o resultado do exame de raios X do mesmo paciente, portanto, são possivelmente relacionados.

As implicações da suposição da Equação 4.4 não são tão óbvias. Apresentam-se, a seguir, duas dessas implicações. Mostra-se, em primeiro lugar, que essas suposições implicam que

$$\{S_1 | +_2 S_2\} = \{S_1 | S_2\}$$

Isso é obtido aplicando-se o Teorema de Bayes e a suposição da Equação 4.4:

$$\begin{aligned} \{S_1 | +_2 S_2\} &= \frac{\{+_2 | S_1 S_2\} \{S_1 | S_2\}}{\{+_2 | S_2\}} \\ &= \frac{\{+_2 | S_2\} \{S_1 | S_2\}}{\{+_2 | S_2\}} \\ &= \{S_1 | S_2\} \end{aligned}$$

Segundo, demonstra-se que, em geral

$$\{S_1 | +_1 S_2\} \neq \{S_1 | +_1\}$$

Utilizando a definição da probabilidade condicional e aplicando as suposições da Equação 4.4:

$$\begin{aligned} \{S_1|+_1S_2\} &= \frac{\{+_1|S_1S_2\}\{S_1|S_2\}}{\{+_1|S_2\}} \\ &= \frac{\{+_1|S_1\}\{S_1|S_2\}}{\{+_1|S_1S_2\}\{S_1|S_2\} + \{+_1|F_1S_2\}\{F_1|S_2\}} \\ &= \frac{\{+_1|S_1\}\{S_1|S_2\}}{\{+_1|S_1\}\{S_1|S_2\} + \{+_1|F_1\}\{F_1|S_2\}} \end{aligned}$$

Por outro lado, pode-se decompor a  $\{S_1|+_1\}$ :

$$\{S_1|+_1\} = \frac{\{+_1|S_1\}\{S_1\}}{\{+_1|S_1\}\{S_1\} + \{+_1|F_1\}\{F_2\}}$$

(Equação 4.8a)

Comparando as equações, conclui-se que, se

$$\{S_1|S_2\} \neq \{S_1\}$$

então,

$$\{S_1|+_1S_2\} \neq \{S_1|+_1\}$$

Em outros termos, somente quando o sucesso do *design*  $O_1$  for independente probabilisticamente do sucesso do  $O_2$ , ocorrerá

$$\{S_1|+_1S_2\} = \{S_1|+_1\}$$

A equação da  $\{S_1|+_2S_2\}$  afirma que a probabilidade de sucesso do  $O_1$  independe do resultado de teste do  $O_2$ , mas depende do resultado real  $S_2$ . Por outro lado, a equação da  $\{S_1|+_1S_2\}$  mostra que, no caso da existência de uma dependência entre  $O_1$  e  $O_2$ , a probabilidade de sucesso do  $O_1$  depende tanto de resultado de teste “+1” como do resultado real do  $O_2$ .

### 4.2.3 – Significado das Influências entre os *Designs*

A dependência probabilística entre os eventos  $S_1$  e  $S_2$ , denominada de influência entre os *designs*, é representada pelas seguintes probabilidades:

$$\{S_i|S_j\} \text{ e } \{S_i|F_j\}$$

onde  $i = 1$  e  $j = 2$  ou  $i = 2$  e  $j = 1$ . Essas são as probabilidades de sucesso condicionais. Para entender esses novos parâmetros, uma das maneiras é compará-los com os já conhecidos: as probabilidades de sucesso *a priori* dos *designs*,  $\{S_i\}$ ,  $i = 1$  ou  $2$ . As possíveis situações são três: a primeira acontece quando:

$$\{S_i|S_j\} = \{S_i\}$$

Isto é, a chance de sucesso do  $O_i$  não é afetada pela ocorrência do sucesso de  $O_j$ . Esses dois eventos são, então, probabilisticamente independentes entre si; em outros termos, inexistem influências entre os *designs*.

A segunda situação aparece quando:

$$\{S_i\} < \{S_i|S_j\}$$

Isso significa que a ocorrência do sucesso de  $O_j$  faz com que a chance de sucesso do  $O_i$  aumente. Existe, então, uma influência positiva entre os *designs*. Isto pode acontecer quando os dois *designs* utilizam o mesmo princípio tecnológico.

A terceira situação ocorre quando:

$$\{S_i\} > \{S_i|S_j\}$$

O que significa que o sucesso do  $O_j$  torna a chance de sucesso do  $O_i$  menor. A influência entre os dois *designs* é negativa. Isso pode ocorrer quando os dois *designs* utilizam princípios tecnológicos opostos. Se um der certo, o outro terá suas chances reduzidas. Nas duas últimas possibilidades, os eventos  $S_1$  e  $S_2$  são, então, probabilisticamente dependentes.

Para um melhor entendimento das implicações dessas três situações, cada uma é analisada em mais profundidade a seguir. Exemplos das situações 2 e 3 são apresentados em primeiro lugar e, depois, se demonstra uma implicação importante da primeira situação, a independência probabilística entre  $S_1$  e  $S_2$ .

*Um exemplo da segunda situação quando  $\{S_i\} < \{S_i | S_j\}$*

Esse exemplo apresenta dois *designs* baseados no mesmo princípio físico, mas diferem somente no valor de um parâmetro do projeto, e mostra que estes dois satisfazem a segunda situação de dependência probabilística.

O projetista precisa projetar uma haste de aço engastada horizontalmente na parede para suportar uma força vertical na ponta. O comprimento da haste já é definido e a única decisão de *design* é o diâmetro da peça. O princípio físico determina que uma haste com diâmetro maior terá maior chance de suportar a força, mas terá peso e custo maiores. Para simplificar o exemplo, suponha-se que o sucesso do *design*  $i$ ,  $S_i$ , é definido pelo evento “haste  $i$  suporta a força sem dobrar ou quebrar”. A principal incerteza do projetista é sobre o diâmetro mínimo da haste ( $d_m$ ) para suportar a força especificada. Ele resolve testar dois *designs*  $O_1$  e  $O_2$ , cada um com os respectivos diâmetros  $d_1$  e  $d_2$ . Supondo que  $d_2 > d_1$ , portanto, o *design*  $O_2$  é mais resistente à força especificada, isto é

$$\{S_2\} > \{S_1\}$$

A derivação das probabilidades  $\{S_i\}$  e  $\{S_i | S_j\}$  pode ser realizada a partir da relação física simples entre os dois *designs*. Para isto, supõe-se que a incerteza sobre  $d_m$  é representada por uma distribuição de probabilidade uniforme<sup>44</sup>, e a faixa de variação do  $d_m$  é normalizada entre 0 e 1<sup>45</sup>. Então, se pode demonstrar que:

$$\begin{aligned} \{S_1\} &= \{d_1 \geq d_m\} = d_1 \text{ e} \\ \{S_2\} &= \{d_2 \geq d_m\} = d_2 \end{aligned}$$

<sup>44</sup> A solução da distribuição uniforme é mais simples e elegante, mas obtenha-se a mesma conclusão se for utilizada uma distribuição genérica.

<sup>45</sup> Uma medida relativa do diâmetro.

Empregando a definição da probabilidade condicional, pode-se escrever:

$$\{S_1 | S_2\} = \{S_1 S_2\} / \{S_2\} = d_1 / d_2 \text{ e}$$

$$\{S_2 | S_1\} = \{S_1 S_2\} / \{S_1\} = d_1 / d_1 = 1$$

Onde a  $\{S_1 S_2\}$  é a probabilidade de os dois *designs* suportarem a força especificada e seu valor é:

$$\{S_1 S_2\} = \{d_m \leq \text{Min}(d_1, d_2)\} = \{d_m \leq d_1\} = d_1$$

Agora fica claro que:

$$\{S_2\} = d_2 \leq \{S_2 | S_1\} = 1$$

Dividindo  $\{S_1\}$  por  $\{S_1 | S_2\}$ , tem-se como resultado:

$$\{S_1\} / \{S_1 | S_2\} = d_2 \leq 1$$

Portanto,

$$\{S_1\} \leq \{S_1 | S_2\}$$

Demonstrou-se, pelo menos para este exemplo simples, que dois *designs* com o mesmo princípio físico resulta em uma dependência probabilística da segunda situação: a ocorrência do sucesso de um *design* influencia positivamente a chance de sucesso do outro.

***Um exemplo da terceira situação quando  $\{S_i\} > \{S_i | S_j\}$***

Esse exemplo é apresentado no trabalho de Loch, Terwiesch e Thomke (2001)<sup>46</sup>. Nos modelos apresentados por esses autores, eles introduziram várias suposições, entre as quais se destacam, para esta discussão, duas: (1) o resultado real de uma alternativa  $i$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ , pode ser um dos dois possíveis estados: sucesso ( $S_i$ ) ou fracasso ( $F_i$ ); e (2) somente uma das  $n$

<sup>46</sup> Vide Capítulo 2 para uma descrição mais detalhada dos modelos desse trabalho.

alternativas terá sucesso. Essa segunda suposição significa que:

$$\sum_{i=1}^N \{S_i\} = 1.$$

Adicionalmente, essa suposição significa que, para  $i \neq j$ :

$$\begin{aligned} \{S_i | S_j\} &= 0 \text{ e} \\ \{F_i | S_j\} &= 1 \end{aligned}$$

Conseqüentemente, essa formulação, de Loch, Terwiesch e Thomke (2001), representa um caso, talvez extremo, da terceira situação de dependência probabilística:

$$\{S_i\} \geq \{S_i | S_j\} = 0$$

É importante notar que o trabalho de Loch, Terwiesch e Thomke (2001) não discute as razões pelas quais essa suposição foi adotada e nem considera outras possíveis situações de lidar com a dependência probabilística entre  $O_i$ .

#### ***Uma implicação da independência probabilística***

Demonstra-se, a seguir, que, no caso em que os resultados reais de  $O_1$  e  $O_2$  forem independentes (inexistem influências entre os *designs*), isto é, se:

$$\begin{aligned} \{S_j | S_i\} &= \{S_j\} \text{ então} \\ \{r_i | r_j\} &= \{r_i\} \text{ para } i = 1 \text{ e } j = 2 \text{ ou } i = 2 \text{ e } j = 1 \end{aligned}$$

No caso de  $\{S_j | S_i\} = \{S_j\}$ , a Equação 4.5 reduz-se para:

$$\{r_j | S_i\} = \{r_j | S_j\} \{S_j\} + \{r_j | F_j\} \{F_j\}$$

que é idêntica à Equação 4.6. Como conseqüência, a Equação 4.2 transforma-se em:

$$\{S_i | r_j\} = \{S_i\}$$

Ou seja,  $S_i$  é independente da  $r_j$ . Substituindo na Equação 4.1, e lembrando a Equação 4.7, resulta em:

$$\{r_i | r_j\} = \{r_i | S_i\} \{S_i\} + \{r_i | F_i\} \{F_i\}$$

Pela regra de expansão de probabilidade, pode-se concluir que:

$$\{r_i | r_j\} = \{r_i\}$$

Em outros termos, se os resultados reais entre  $O_1$  e  $O_2$  fossem independentes probabilisticamente, e as suposições da Equação 4.4 se aplicam, os resultados de testes imperfeitos de  $O_1$  e  $O_2$  são também independentes probabilisticamente.

#### 4.2.4 – Relações entre $\{S_i | r_i r_j\}$ e $\{S_i | r_i\}$

A determinação da probabilidade  $\{S_i | r_i r_j\}$  é necessária para identificar a melhor estratégia de teste (vide Seção 4.3), entretanto, o seu cálculo é mais complexo (vide a Equação 4.8). Seria interessante que uma forma mais fácil de estimar a  $\{S_i | r_i r_j\}$  fosse disponibilizada para os projetistas. A análise das relações entre  $\{S_i | r_i r_j\}$  e  $\{S_i | r_i\}$  é uma tentativa nesta direção, mais especificamente, procura-se responder às seguintes questões:

- 1) Supondo que os dois *designs* são dependentes probabilisticamente, mas o projetista resolve utilizar  $\{S_i | r_i\}$ , no lugar da  $\{S_i | r_i r_j\}$ , para selecionar as estratégias de teste. Qual seria o erro, i.e., a diferença entre  $\{S_i | r_i r_j\}$  e  $\{S_i | r_i\}$ ?
- 2) Como esse erro é influenciado pelo tipo de dependência entre os *designs*?

Os resultados desta Subseção mostram que as influências entre os *designs* são fatores determinantes dos erros de estimativas.

Uma forma alternativa de decompor a  $\{S_i | r_i r_j\}$ , a partir da Equação 4.8, é:

$$\{S_i | r_i r_j\} = \frac{\{r_i | S_i\} \{r_j | S_i\} \{S_i\}}{\{r_j | r_i\} \{r_i\}}$$

Como

$$\{S_i | r_i\} = \frac{\{r_i | S_i\} \{S_i\}}{\{r_i\}}$$

Então

$$\{S_i | r_i r_j\} = \left[ \frac{\{r_j | S_i\}}{\{r_j | r_i\}} \right] \{S_i | r_i\}$$

(Equação 4.9)

Definindo  $\gamma = \left[ \frac{\{r_j | S_i\}}{\{r_j | r_i\}} \right]$ , então se  $\gamma > 1$ ,

$$\{S_i | r_i r_j\} > \{S_i | r_i\}$$

Isto é,  $\{S_i | r_i\}$  subestima a probabilidade de sucesso do  $O_i$ . Caso contrário, se  $\gamma < 1$ , a  $\{S_i | r_i\}$  superestima a probabilidade de sucesso do  $O_i$ .

Para determinar as condições sob as quais  $\gamma > 1$  ou  $\gamma < 1$ , as probabilidades  $\{r_j | S_i\}$  e  $\{r_j | r_i\}$  são detalhadas. Aplicando a regra de expansão e as suposições da Equação 4.4, obtém-se:

$$\{r_j | S_i\} = \{r_j | S_j\} \{S_j | S_i\} + \{r_j | F_j\} \{F_j | S_i\}$$

(Equação 4.10)

$$\{r_j | r_i\} = \{r_j | S_j\} \{S_j | r_i\} + \{r_j | F_j\} \{F_j | r_i\}$$

(Equação 4.11)

Para facilitar as operações algébricas, empregam-se os seguintes símbolos para representar as probabilidades:  $A = \{r_j | S_i\}$ ;  $B = \{r_j | r_i\}$ ;  $p = \{S_j | S_i\}$ ;  $q = \{S_j | r_i\}$ ;  $\alpha = \{r_j | S_j\}$ ; e  $\beta = \{r_j | F_j\}$ . O parâmetro  $\gamma$  agora é  $\gamma = \left[ \frac{A}{B} \right]$  e as Equações 4.10 e 4.11 podem ser reescritas como:

$$A = \alpha p + \beta(1 - p) \quad (\text{Equação 4.10A})$$

$$B = \alpha q + \beta(1 - q) \quad (\text{Equação 4.11A})$$

Subtraindo  $B$  da  $A$ , chega-se a:

$$A - B = (\alpha - \beta)(p - q) \quad (\text{Equação 4.12})$$

A Equação 4.12 mostra que:

$$\text{se } (\alpha - \beta)(p - q) > 0, \text{ então } \frac{A}{B} = \gamma > 1 \text{ e}$$

$$\text{se } (\alpha - \beta)(p - q) < 0, \text{ então } \frac{A}{B} = \gamma < 1$$

Nota-se que os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  são medidas de desempenho do teste, portanto, são conhecidas pelo projetista. Os valores de  $\alpha$  e  $\beta$  dependem fundamentalmente do estado específico do  $r_j$ . Existem, então, dois casos; o primeiro acontece quando  $r_j = +_j$ . Nesta situação, em geral, espera-se que a chance de obter  $+_j$  dado  $S_j$  seja maior que quando é dado  $F_j$ . Isto é:

$$\{+_j | S_j\} > \{+_j | F_j\}, \text{ ou } \alpha > \beta$$

No segundo caso, quando  $r_j = -_j$ , utilizando o mesmo raciocínio, a conclusão é:  $\alpha < \beta$ . Adicionalmente, o valor do  $\gamma$  depende da relação entre  $p$  e  $q$ . Essa relação pode ser obtida expandindo  $q$  e aplicando as suposições da Equação 4.4:

$$q = \{S_j | r_i\} = \{S_j | S_i\} \cdot \{S_i | r_i\} + \{S_j | F_i\} \cdot \{F_i | r_i\} \text{ ou}$$

$$q = p\{S_i | r_i\} + z \{F_i | r_i\}, \text{ onde } z = \{S_j | F_i\}$$

(Equação 4.13)

Para facilitar a análise, define-se  $z = \xi p$ , onde  $\xi > 0$ , então:

$$q = p\{S_i | r_i\} + \xi * p(1 - \{S_i | r_i\})$$

Donde, se  $\xi > 1$ , então:

$$\frac{q}{p} > 1, \text{ ou } p - q < 0$$

Caso contrário, isto é,  $\xi < 1$ , então:

$$\frac{q}{p} < 1, \text{ ou } p - q > 0$$

Agora, é importante entender o significado de  $\xi > 1$  e  $\xi < 1$ . No caso de  $\xi > 1$ , a definição de  $\xi$  determina:

$$\{S_j | F_i\} > \{S_j | S_i\}$$

Isso significa que dado o fracasso do outro *design*, a chance de sucesso do  $O_j$  é maior do que quando é conhecido que o outro teve sucesso. Em outros termos, os dois *designs* empregam princípios de projetos opostos e, conseqüentemente, têm influências negativas entre eles.

No caso de  $\xi < 1$ , a definição de  $\xi$  determina:

$$\{S_j | F_i\} < \{S_j | S_i\}$$

Ou seja, o sucesso do  $O_i$  faz aumentar a probabilidade de sucesso do  $O_j$ . Então, os dois *designs* utilizam o mesmo princípio de projeto e, portanto, têm influências positivas entre eles. Os resultados acima são sintetizados na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2 – Determinantes da Relação entre  $\{S_i|r_i r_j\}$  e  $\{S_i|r_i\}$**

		$r_j$	
		$-j$	$+j$
$\xi$	$\xi < 1$ Designs com princípios similares	$\alpha - \beta < 0$ e $p - q > 0$ $\frac{A}{B} = \gamma < 1$ $\{S_i r_i r_j\} < \{S_i r_i\}$	$\alpha - \beta > 0$ e $p - q > 0$ $\frac{A}{B} = \gamma > 1$ $\{S_i r_i r_j\} > \{S_i r_i\}$
	$\xi > 1$ Designs com princípios opostos	$\alpha - \beta < 0$ e $p - q < 0$ $\frac{A}{B} = \gamma > 1$ $\{S_i r_i r_j\} > \{S_i r_i\}$	$\alpha - \beta > 0$ e $p - q < 0$ $\frac{A}{B} = \gamma < 1$ $\{S_i r_i r_j\} < \{S_i r_i\}$

A Tabela 4.2 mostra que as informações necessárias para definir a relação entre  $\{S_i|r_i r_j\}$  e  $\{S_i|r_i\}$  são duas: o estado do  $r_j$  e o tipo de influência entre os dois *designs*. Esses resultados são também aproveitados para determinar as estratégias ótimas de testes na Seção 4.3.

Finalmente, podem-se estabelecer limites superior e inferior para  $\gamma$ , que representam as diferenças entre  $\{S_i|r_i r_j\}$  e  $\{S_i|r_i\}$ , ou o erro de utilizar  $\{S_i|r_i\}$  no lugar de  $\{S_i|r_i r_j\}$ . Esses limites de  $\gamma$  podem ser estabelecidos analisando-se as Equações 4.10A e 4.11A. Existem duas situações. Na primeira, com  $r_j = +j$ , obtém-se  $\alpha - \beta > 0$ . Neste caso, o máximo de  $\gamma$  é atingido quando  $p = 1$  e  $q = 0$ , ou seja:

$$\gamma_{max} = \frac{\alpha}{\beta} = \frac{\{+j|S_j\}}{\{+j|F_j\}}$$

E o mínimo de  $\gamma$  é atingido quando  $p = 0$  e  $q = 1$ :

$$\gamma_{min} = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{\{+j|F_j\}}{\{+j|S_j\}}$$

Na segunda situação, com  $r_j = -j$ , resulta  $\alpha - \beta < 0$ . Neste caso, o máximo de  $\gamma$  é atingido quando:

$$\gamma_{max} = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{\{-j|F_j\}}{\{-j|S_j\}}$$

E o mínimo de  $\gamma$  é atingido quando  $p = 1$  e  $q = 0$ :

$$\gamma_{min} = \frac{\alpha}{\beta} = \frac{\{-j|S_j\}}{\{-j|F_j\}}$$

A Tabela 4.3 sintetiza esses resultados e mostra dois exemplos numéricos.

**Tabela 4.3 – Diferenças Extremas entre  $\{S_i|r_i r_j\}$  e  $\{S_i|r_i\}$**

	$r_j$	
	$-j$	$+j$
$\gamma_{max}$	$\frac{\{-j F_j\}}{\{-j S_j\}}$ $\gamma_{max} = 4,5 (Ex_1)$ $\gamma_{max} = 2,0 (Ex_2)$	$\frac{\{+j S_j\}}{\{+j F_j\}}$ $\gamma_{max} = 8,0 (Ex_1)$ $\gamma_{max} = 1,8 (Ex_2)$
$\gamma_{min}$	$\frac{\{-j S_j\}}{\{-j F_j\}}$ $\gamma_{min} = 0,22 (Ex_1)$ $\gamma_{min} = 0,50 (Ex_2)$	$\frac{\{+j F_j\}}{\{+j S_j\}}$ $\gamma_{min} = 0,13 (Ex_1)$ $\gamma_{min} = 0,57 (Ex_2)$

Os exemplos numéricos usam as seguintes probabilidades:

	Exemplo 1	Exemplo 2
$\{+_j   S_j\} =$	0,8	0,7
$\{-_j   F_j\} =$	0,9	0,6

Nota-se que o  $\gamma_{max}$  é o inverso do  $\gamma_{min}$ . Adicionalmente, observa-se que a faixa provável de variação de  $\{S_i | r_i r_j\}$  em relação a  $\{S_i | r_i\}$  é significativa. No Exemplo 1, a  $\{S_i | r_i r_j\}$  pode ser oito vezes maior que  $\{S_i | r_i\}$ . Quando o desempenho do teste piora, como no Exemplo 2, a faixa provável de variação reduz-se bastante. Isto significa que quando o teste é mais confiável, o erro de ignorar a dependência é maior.

É importante notar que, para estimar  $\gamma_{max}$  e  $\gamma_{min}$ , assumiram-se valores extremos para  $p$  e  $q$ . Isto é um artifício usado para estabelecer os limites. A Equação 4.13 mostra que as probabilidades  $p$  e  $q$  são relacionadas, portanto, não se podem designar valores independentes para esses parâmetros. Isso indica que  $\gamma_{max}$  e  $\gamma_{min}$  estimados são limites que não são realmente atingidos, mas podem ser usados para delimitar a provável faixa de variação de  $\{S_i | r_i r_j\}$  em relação a  $\{S_i | r_i\}$ . Apesar dessa imprecisão, acredita-se que estes  $\gamma_{max}$  e  $\gamma_{min}$ , por serem muito fáceis de calcular, podem ser úteis para estimar os possíveis erros de ignorar a dependência entre os *designs*.

Observa-se, adicionalmente, que os parâmetros  $\gamma_{max}$  e  $\gamma_{min}$  dependem exclusivamente do desempenho do teste imperfeito. Quando um teste é mais confiável, a diferença entre  $\gamma_{max}$  e  $\gamma_{min}$  aumenta. No caso contrário, a diferença diminui. Esse resultado corresponde à intuição: quando a confiabilidade de teste no  $O_j$  é maior, é mais importante considerar explicitamente o resultado de teste,  $r_j$ , na estimação da chance de  $S_i$ . Conseqüentemente, ignorando  $r_i$  gera-se maior erro na avaliação de  $\{S_i | r_i r_j\}$ .

**Relação entre  $\{S_2 | -_1\}$  e  $\{S_2 | -_1 +_2\}$**

A relação entre  $\{S_2|-1\}$  e  $\{S_2|-1+2\}$  é importante para identificar a estratégia ótima na Seção 4.3, entretanto, essas duas probabilidades condicionais são diferentes das da Tabela 4.2, que compara  $\{S_i|r_i r_j\}$  e  $\{S_i|r_i\}$  e não  $\{S_i|r_i r_j\}$  e  $\{S_i|r_j\}$ . Intuitivamente espera-se que  $\{S_2|-1\} \leq \{S_2|-1+2\}$  e a prova dessa inequação é apresentada a seguir. Inicialmente, decompondo a  $\{S_2|-1+2\}$ :

$$\{S_2|-1+2\} = \frac{\{+2|S_2-1\}\{-1|S_2\}\{S_2\}}{\{+2|-1\}\{-1\}}$$

como

$$\{S_2|-1\} = \frac{\{-1|S_2\}\{S_2\}}{\{-1\}}$$

portanto

$$\{S_2|-1+2\} = \frac{\{+2|S_2\}}{\{+2|-1\}} \{S_2|-1\}$$

O próximo passo é decompor a:

$$\{+2|-1\} = \{+2|S_1\}\{S_1|-1\} + \{+2|F_1\}\{F_1|-1\}$$

e como:

$$\{+2|S_1\} = \{+2|S_2\}\{S_2|S_1\} + \{+2|F_2\}\{F_2|S_1\} \text{ e}$$

$$\{+2|F_1\} = \{+2|S_2\}\{S_2|F_1\} + \{+2|F_2\}\{F_2|F_1\}$$

Substituindo e re-arranjando, chega-se a:

$$\{+2|-1\} = \frac{[f\{S_2|S_1\} + (1-f)(1-\{S_2|S_1\})](1-f)s + [f\{S_2|F_1\} + (1-f)\{F_2|F_1\}]f(1-s)}{(1-f)s + f(1-s)}$$

Como  $f \geq 0,5$ , onde:

$$f\{S_2|S_1\} + (1-f)(1-\{S_2|S_1\}) \leq f \text{ e}$$

$$f\{S_2|F_1\} + (1-f)\{F_2|F_1\} \leq f$$

O resultado é:

$$\frac{\{+2|S_2\}}{\{+2|-1\}} \geq 1$$

E, conseqüentemente, é demonstrada a relação:

$$\{S_2|-1+2\} \geq \{S_2|-1\}$$

#### 4.2.5 – Relações entre Diferentes $\{S_i|r_i r_j\}$

O problema de testes deste capítulo conta com oito probabilidades condicionais do tipo  $\{S_i|r_i r_j\}$ , pois cada um dos três eventos dessa probabilidade pode ter dois estados:  $S_i = S_1$  ou  $S_2$ ,  $r_1 = +_1$  e  $-_1$  e  $r_2 = +_2$  ou  $-_2$ . Esta Subseção examina as relações entre essas oito probabilidades. O objetivo é estabelecer a ordem entre as  $\{S_i|r_i r_j\}$ . Os resultados são empregados na determinação da estratégia ótima de teste, a ser discutida na Seção 4.3.

Supondo que as probabilidades de sucesso, *a priori*, das duas opções sejam iguais e a confiabilidade do teste seja igual para os dois *designs*, pode-se escrever:

$$\{S_1\} = \{S_2\} = s, \text{ e}$$

$$\{+_1|S_1\} = \{+_2|S_2\} = \{-_1|F_1\} = \{-_2|F_2\} = f.$$

E supondo, adicionalmente, que as influências entre os dois *designs* são positivas, isto é

$$\{S_2|S_1\} > \{S_2\}, \text{ e}$$

$$\{S_1|S_2\} > \{S_1\}.$$

Isso pode ocorrer porque os dois projetos são baseados nos mesmos princípios físicos. Nessas condições, pode-se demonstrar matematicamente que:

$$\{S_1|+_1 +_2\} = \{S_2|+_1 +_2\} \geq \{S_1|+_1 -_2\} = \{S_2|+_1 -_2\},$$

$$\{S_1|+_1 -_2\} = \{S_2|+_1 -_2\} \geq \{S_1|+_1 +_2\} = \{S_2|+_1 +_2\}, \text{ e}$$

$$\{S_1|+_1 +_2\} = \{S_2|+_1 +_2\} \geq \{S_1|+_1 -_2\} = \{S_2|+_1 -_2\}.$$

Intuitivamente, essas relações fazem sentido, e o objetivo aqui é provar matematicamente que a ordem entre as  $\{S_i|r_i r_j\}$  é essa mostrada acima. Como as demonstrações são similares, apresentam-se somente duas provas, uma da igualdade e outra da inequação, a seguir.

**Demonstração de  $\{S_1|+_1 +_2\} = \{S_2|+_1 +_2\}$**

Aplicando o Teorema de Bayes:

$$\{S_1|+_1 +_2\} = \frac{\{S_1 +_1 +_2\}}{\{+_1 +_2\}}$$

Expandindo o numerador da  $\{S_1|+_1 +_2\}$ , aplicando a suposição Equação 4.4, e expandindo a  $\{+_2|S_1\}$  para:

$$\{+_2|S_1\} = \{+_2|S_2\}\{S_2|S_1\} + \{+_2|F_2\}\{F_2|S_1\}$$

Substituindo esses resultados na  $\{S_1|+_1+_2\}$ , obtém-se:

$$\{S_1|+_1+_2\} = \frac{\{+_1|S_1\}\{S_1\}[\{+_2|S_2\}\{S_2|S_1\} + \{+_2|F_2\}\{F_2|S_1\}]}{\{+_1+_2\}} \quad (\text{Equação 4.14})$$

Analogamente, pode-se deduzir:

$$\{S_2|+_1+_2\} = \frac{\{+_2|S_2\}\{S_2\}[\{+_1|S_1\}\{S_1|S_2\} + \{+_1|F_1\}\{F_1|S_2\}]}{\{+_1+_2\}} \quad (\text{Equação 4.15})$$

Para provar que  $\{S_1|+_1+_2\} = \{S_2|+_1+_2\}$ , nota-se que:

$$\{+_1|S_1\} = \{+_2|S_2\} = f, \quad \{+_2|F_2\} = \{+_1|F_1\} = 1-f \quad \text{e} \quad \{S_1\} = \{S_2\} = s$$

Adicionalmente, aplicando o Teorema de Bayes  $\{S_1|S_2\} = \frac{\{S_2|S_1\}\{S_1\}}{\{S_2\}} = \{S_2|S_1\}$  Pois  $\{S_1\} = \{S_2\}$ .

Finalmente, como

$$\{F_2|S_1\} = 1 - \{S_2|S_1\} \quad \text{e} \quad \{F_1|S_2\} = 1 - \{S_1|S_2\}$$

onde

$$\{F_2|S_1\} = \{F_1|S_2\}$$

Então se conclui a prova de que:

$$\{S_1|+_1+_2\} = \{S_2|+_1+_2\}$$

Dadas as simetrias entre as duas opções de *design*, demonstradas acima, pode-se concluir que:

$$\{S_1|+1-2\} = \{S_2|-1+2\} \text{ e } \{S_2|-1+2\} = \{S_2|+1-2\}$$

**Demonstração de  $\{S_1|+1+2\} \geq \{S_1|+1-2\}$**

Já foi mostrado que:

$$\{S_1|+1+2\} = \frac{\{+1|S_1\}\{+2|S_1\}\{S_1\}}{\{+2|+1\}\{+1\}}$$

E, analogamente, pode-se obter:

$$\{S_1|+1-2\} = \frac{\{-2|S_1\}\{+1|S_1\}\{S_1\}}{\{-2|+1\}\{+1\}}$$

Dividindo essas probabilidades, chega-se:

$$\frac{\{S_1|+1+2\}}{\{S_1|+1-2\}} = \frac{\{+2|S_1\} \cdot \{-2|+1\}}{\{+2|+1\} \cdot \{-2|S_1\}}$$

(Equação 4.16)

O objetivo da demonstração é provar que o lado direito da Equação 4.16 é maior que um. Para tanto, as quatro probabilidades do lado direito da igualdade acima podem ser decompostas:

$$\begin{aligned} \{+2|S_1\} &= \{+2|S_2\}\{S_2|S_1\} + \{+2|F_2\}\{F_2|S_1\}, \\ \{+2|+1\} &= \{+2|S_1\}\{S_1|+1\} + \{+2|F_1\}\{F_1|+1\} \\ &= \{+2|S_1\} \left( \frac{\{+1|S_1\}\{S_1\}}{\{+1\}} \right) + \{+2|F_1\} \left( \frac{\{+1|F_1\}\{F_1\}}{\{+1\}} \right), \text{ onde} \\ \{+1\} &= \{+1|S_1\}\{S_1\} + \{+1|F_1\}\{F_1\} \text{ e} \\ \{+2|F_1\} &= \{+2|S_2\}\{S_2|F_1\} + \{+2|F_2\}\{F_2|F_1\} \end{aligned}$$

Substituindo essas expressões na  $\{+2|+1\}$  e usando  $s = \{S_1\} = \{S_2\}$  e  $f = \{+1|S_1\} = \{+2|S_2\} = \{-1|F_1\} = \{-2|F_2\}$ , pode-se escrever:

$$\{+2|+1\} = \frac{[(f\{S_2|S_1\} + (1-f)\{F_2|S_1\})fs + (f\{S_2|F_1\} + (1-f)\{F_2|F_1\})(1-f)(1-s)]}{[fs + (1-f)(1-s)]}$$

Analogamente, pode-se deduzir que:

$$\begin{aligned}\{-2|S_1\} &= (1-f)\{S_2|S_1\} + f\{F_2|S_1\}, \\ \{-2|F_1\} &= (1-f)\{S_2|F_1\} + f\{F_2|F_1\}, \text{ e}\end{aligned}$$

$$\{-2|+1\} = \frac{[((1-f)\{S_2|S_1\} + f\{F_2|S_1\})fs + ((1-f)\{S_2|F_1\} + f\{F_2|F_1\})(1-f)(1-s)]}{[fs + (1-f)(1-s)]}$$

Agora, a expressão Equação 4.16 pode ser reescrita:

$$\frac{\{S_1|+1+2\}}{\{S_1|+1-2\}} = \frac{\left[ fs + \frac{((1-f)\{S_2|F_1\} + f\{F_2|F_1\})}{((1-f)\{S_2|S_1\} + f\{F_2|S_1\})} (1-f)(1-s) \right]}{\left[ fs + \frac{(f\{S_2|F_1\} + (1-f)\{F_2|F_1\})}{(f\{S_2|S_1\} + (1-f)\{F_2|S_1\})} (1-f)(1-s) \right]}$$

(Equação 4.17)

Para simplificar as operações algébricas, designa-se:

$$\begin{aligned}x_1 &= (1-f)\{S_2|F_1\} + f\{F_2|F_1\}, \\ y_1 &= (1-f)\{S_2|S_1\} + f\{F_2|S_1\}, \\ x_2 &= f\{S_2|F_1\} + (1-f)\{F_2|F_1\}, \text{ e} \\ y_2 &= f\{S_2|S_1\} + (1-f)\{F_2|S_1\}.\end{aligned}$$

Onde a Equação 4.17 é simplificada para:

$$\frac{\{S_1|+1+2\}}{\{S_1|+1-2\}} = \frac{fs + \left(\frac{x_1}{y_1}\right)(1-f)(1-s)}{fs + \left(\frac{x_2}{y_2}\right)(1-f)(1-s)}$$

(Equação 4.18)

O objetivo agora é provar:

$$\left(\frac{x_1}{y_1}\right) > \left(\frac{x_2}{y_2}\right)$$

Para tanto, as probabilidades  $\{S_2|F_1\}$ ,  $\{F_2|F_1\}$  e  $\{F_2|S_1\}$  devem ser representadas por probabilidades conhecidas, tais como  $s$  e  $\{S_2|S_1\}$ . Para simplificar mais a anotação, designa-se:

$$\{S_2|S_1\} = \{S_1|S_2\} = a$$

Então:

$$\{F_2|S_1\} = 1 - \{S_2|S_1\} = 1 - a,$$

(Equação 4.19)

$$\begin{aligned} \{S_2|F_1\} &= \frac{\{F_1|S_2\}\{S_2\}}{\{F_1\}} \\ &= \frac{(1 - \{S_1|S_2\})\{S_2\}}{(1 - \{S_1\})} \\ &= \frac{(1-a)s}{(1-s)}, \text{ e} \end{aligned}$$

(Equação 4.20)

$$\begin{aligned} \{F_2|F_1\} &= 1 - \left\{\frac{1-a}{1-s}\right\}s \\ &= \frac{1-2s+as}{1-s} \end{aligned}$$

(Equação 4.21)

Substituindo essas probabilidades na relação  $(x_I/y_I)$ :

$$\frac{x_I}{y_I} = \frac{(1-f)\left(\frac{1-a}{1-s}\right)s + f\left(\frac{1-2s+as}{1-s}\right)}{(1-f)a + f(1-a)}$$

Nota-se que:

$$\frac{1-2s+as}{1-s} = 1 - \left(\frac{1-a}{1-s}\right)s$$

Onde a soma dos coeficientes de  $(1-f)$  e de  $f$ , tanto do  $x_I$  como do  $y_I$ , é igual a um. Como foi assumido que:

$$\{S_2|S_1\} = a > \{S_2\} = s$$

Pode-se concluir que:

$$1 - \left(\frac{1-a}{1-s}\right)s > 1-s$$

E como  $1-s > 1-a$ , conseqüentemente:

$$\left(\frac{1-2s+as}{1-s}\right) > (1-a)$$

Lembrando que  $f \geq 0,5$ , então pode-se concluir que:

$$\frac{x_I}{y_I} \geq 1$$

(Equação 4.22)

Analogamente, para  $a > s$  e  $f \geq 0,5$ , pode-se demonstrar que:

$$\frac{x_2}{y_2} \leq 1$$

(Equação 4.23)

Finalmente, substituindo a Equação 4.22 e a Equação 4.23, na Equação 4.18, chega-se a:

$$\{S_1|+1+2\} \geq \{S_1|+1-2\}$$

Utilizando procedimentos similares, pode-se demonstrar a seguinte ordem entre as probabilidades do tipo  $\{S_i|r_i r_j\}$ :

$$\begin{aligned} \{S_1|+1+2\} &= \{S_2|+1+2\} \geq \{S_1|+1-2\} = \{S_2|-1+2\}, \\ \{S_1|+1-2\} &= \{S_2|-1+2\} \geq \{S_1|-1+2\} = \{S_2|+1-2\}, \text{ e} \\ \{S_1|-1+2\} &= \{S_2|+1-2\} \geq \{S_1|-1-2\} = \{S_2|-1-2\}. \end{aligned}$$

(Equação 4.24)

É importante notar que essa ordem entre as probabilidades  $\{S_i|r_i r_j\}$  é obtida sob as seguintes condições:

$$\begin{aligned} \{S_2|S_1\} = \{S_1|S_2\} &= a \geq \{S_1\} = \{S_2\} = s, \text{ e} \\ \{+1|S_1\} = \{+2|S_2\} &= \{-1|F_1\} = \{-2|F_2\} = f \geq 0,5. \end{aligned}$$

A condição mais relevante é a primeira: a existência de influência ou relacionamento positivo entre os dois *designs*.

#### 4.2.6 – Algumas relações entre $\{S_i|r_j\}$

A ordem entre algumas probabilidades condicionais do tipo  $\{S_i|r_j\}$  é importante para a otimização da estratégia de testes, a ser discutida na Seção 4.3, e essas relações são demonstradas nesta subseção.

**Demonstração de  $\{S_1|+1\} \geq \{S_2|+1\}$**

Para demonstrar esta inequação, as duas probabilidades são decompostas, inicialmente. A Equação 4.8a mostra que:

$$\{S_1|+_1\} = \frac{fs}{fs + (1-f)(1-s)} \quad (\text{Equação 4.8a})$$

Por outro lado, decompondo a  $\{S_2|+_1\}$ , obtém-se:

$$\begin{aligned} \{S_2|+_1\} &= \{S_2|S_1\}\{S_1|+_1\} + \{S_2|F_1\}\{F_1|+_1\} \\ &= \{S_1|+_1\}(\{S_2|S_1\} - \{S_2|F_1\}) + \{S_2|F_1\} \end{aligned}$$

Substituindo a Equação 4.8a, a Equação 4.19 e a Equação 4.20, na equação acima, chega-se a:

$$\{S_2|+_1\} = \left[ \frac{fs}{fs + (1-f)(1-s)} \right] \left( \frac{a-s}{1-s} \right) + \left( \frac{1-a}{1-s} \right) s$$

E que, depois de algumas operações algébricas, resulta em:

$$\{S_2|+_1\} = \frac{[a(2f-1) + (1-f)]s}{fs + (1-f)(1-s)} \quad (\text{Equação 4.26})$$

Comparando a Equação 4.8a e a Equação 4.26, fica evidente que as diferenças estão entre os componentes  $f$  e  $[a(2f-1) + (1-f)]$ . Subtraindo um de outro:

$$f - [a(2f-1) + (1-f)] = (2f-1)(1-a)$$

Como  $f \geq 0,5$  e  $a \leq 1$ , conclui-se que:

$$f - [a(2f-1) + (1-f)] \geq 0$$

Conseqüentemente, é provada a inequação:

$$\{S_1 +_1\} \geq \{S_2 +_1\}$$

(Equação 4.27)

*Demonstração de  $\{S_2 |_{-1}\} \geq \{S_1 |_{-1}\}$*

Esta prova é realizada através da decomposição separada destas probabilidades:

$$\{S_1 |_{-1}\} = \frac{\{-1 | S_1\} \{S_1\}}{\{-1 | S_1\} \{S_1\} + \{-1 | F_1\} \{F_1\}}$$

Substituindo  $\{-1 | S_1\} = (1 - f)$  e  $\{S_1\} = s$ , chega-se a:

$$\{S_1 |_{-1}\} = \frac{(1 - f)s}{(1 - f)s + f(1 - s)}$$

(Equação 4.28)

Agora, a  $\{S_2 |_{-1}\}$  pode ser expandida da seguinte maneira:

$$\{S_2 |_{-1}\} = \{S_2 | S_1\} \{S_1 |_{-1}\} + \{S_2 | F_1\} (1 - \{S_1 |_{-1}\})$$

Substituindo  $f$ ,  $s$  e  $a = \{S_1 | S_2\} = \{S_2 | S_1\}$  na expressão acima e re-arranjando os termos, obtém-se:

$$\{S_2 |_{-1}\} = \frac{[(1 - 2f)a + f]s}{(1 - f)s + f(1 - s)}$$

(Equação 4.29)

Como os lados direitos da Equação 4.28 e da Equação 4.29 diferem somente nos termos  $(1 - f)$  e  $[(1 - 2f)a + f]$ , pode-se compará-los através de subtração:

$$[(1 - 2f)a + f] - (1 - f) = (2f - 1)(1 - a)$$

Como  $f \geq 0,5$  e  $0 \leq a \leq 1$ , conclui-se que:

$$\{S_2|-_1\} \geq \{S_1|-_1\}$$

(Equação 4.30)

### 4.3 – Estratégia Ótima de Teste

Os objetivos desta Seção são dois: o primeiro é determinar a melhor estratégia de testes para o problema com dois *designs* e dois testes, sendo um perfeito, e o segundo é analisar o papel das influências, ou das dependências probabilísticas, entre os *designs*, na determinação de estratégias ótimas. Uma estratégia de testes pode ser definida como a fixação de uma alternativa em cada ponto de decisão na árvore da Figura 4.1. A melhor estratégia é, então, aquela com o maior valor esperado no ponto de decisão  $\underline{U}$  da Figura 4.1. Entretanto, a melhor alternativa do ponto  $\underline{U}$  só pode ser definida sabendo-se as melhores alternativas em cada ponto de decisão subsequente ao  $\underline{U}$ . Essa é a razão pela qual se inicia a determinação das alternativas ótimas nos pontos de decisão  $\underline{W}_i$  e  $\underline{Y}_i$  na Subseção 4.3.1, depois nos pontos  $\underline{V}_i$  (Subseção 4.3.2), e, por último, o ponto  $\underline{U}$ . A identificação da melhor estratégia requer o uso intensivo dos resultados obtidos na Seção anterior, particularmente as relações entre as probabilidades condicionais.

#### 4.3.1 – Alternativas Ótimas em $\underline{W}_i$ e $\underline{Y}_i$

Os pontos de decisão  $\underline{W}_i$  e  $\underline{Y}_i$ ,  $i = 1, 2, 3$  e  $4$ , da Figura 4.1, são analisados em conjunto, pois são similares sob vários aspectos. Primeiro, estas decisões são tomadas conhecendo-se os resultados dos testes das duas opções de *design* ( $O_1$  e  $O_2$ ). Segundo, as alternativas disponíveis em cada ponto são idênticas: lançar  $O_1$ , lançar  $O_2$  ou abandonar. Estas semelhanças permitem uma análise conjunta destes oito pontos de decisão.

A Tabela 4.4 abaixo apresenta as alternativas e os respectivos valores esperados em cada um dos oito pontos de decisão. Nota-se que, nos pontos  $\underline{W}_1$  e  $\underline{Y}_1$ , as alternativas e os respectivos valores esperados são idênticos, e o mesmo ocorre com os outros pares  $\underline{W}_i$  e  $\underline{Y}_i$ ,  $i = 2, 3$  e  $4$ .

Em cada ponto de decisão,  $\underline{W}_i$  ou  $\underline{Y}_i$ ,  $i = 1, 2, 3$  e  $4$ , a melhor alternativa é aquela com maior valor esperado. Como a alternativa “abandona” tem seu valor esperado zerado, a determinação da melhor alternativa depende da resposta à seguinte pergunta: Alguns valores esperados das alternativas de lançamento são positivos?

São três as possíveis respostas a esta pergunta, em cada ponto de decisão  $\underline{W}_i$  ou  $\underline{Y}_i$ :

Caso 1 – Os dois valores esperados de lançamento são negativos e, conseqüentemente, a alternativa ótima seria a de “abandona”;

Caso 2 – Somente uma alternativa de lançamento tem valor esperado positivo, e, conseqüentemente, seria a melhor alternativa; e

Caso 3 – As duas alternativas de lançamento têm valores esperados positivos, neste caso, a melhor alternativa é aquela com o maior valor esperado.

A designação do caso para cada ponto de decisão depende então dos sinais dos valores esperados das alternativas de lançamento. Para um ponto de decisão genérico, da Tabela 4.4, as considerações acima mostram que é importante verificar se:

$$VELO_1 = -C_1 + \{S_1 | r_1 r_2\} R \alpha^{t_1} > 0, e \quad (\text{Equação 4.31})$$

$$VELO_2 = -C_1 + \{S_2 | r_1 r_2\} R \alpha^{t_1} > 0, \quad (\text{Equação 4.32})$$

Onde:

$r_1$  = resultado de teste da  $O_1$ ;

$r_2$  = resultado de teste da  $O_2$ ;

$VELO_1$  = valor esperado da alternativa “lança  $O_1$ ”;

$VELO_2$  = valor esperado da alternativa “lança  $O_2$ ”;

Colocando em outra forma, é, então, necessário verificar se:

$$\{S_1 | r_1 r_2\} > \frac{C_1}{R \alpha^{t_1}}, e \quad (\text{Equação 4.33})$$

$$\{S_2 | r_1 r_2\} > \frac{C_1}{R \alpha^{t_1}}, \quad (\text{Equação 4.34})$$

O Caso 1 é a situação na qual ocorre  $\{S_1 | r_1 r_2\} < \frac{C_1}{R \alpha^{t_1}}$ , e  $\{S_2 | r_1 r_2\} < \frac{C_1}{R \alpha^{t_1}}$ ; o Caso 2 é a situação na qual somente uma das inequações, Equação 4.33 ou Equação 4.34, se

confirma; e o Caso 3 é a situação na qual as duas inequações, Equação 4.33 e Equação 4.34, se confirmam.

No Caso 3, a determinação da melhor alternativa depende de uma comparação entre  $VELO_1$  e  $VELO_2$ . Uma simples análise das equações destes valores esperados mostra as seguintes relações:

Se:

$$\{S_1|r_1r_2\} \geq \{S_2|r_1r_2\};$$

então:

$$VELO_1 \geq VELO_2;$$

Ou se:

$$\{S_1|r_1r_2\} \leq \{S_2|r_1r_2\};$$

Então:

$$VELO_1 \leq VELO_2;$$

Algumas conclusões podem ser colocadas a partir destas análises iniciais. Primeira, o sinal do valor esperado de alternativa de lançar o  $O_i$  depende da relação entre  $\{S_1|r_1r_2\}$  e  $(C_i / R\alpha^{t_i})$ . Segunda, a ordem dos mesmos valores esperados depende da ordem entre  $\{S_1|r_1r_2\}$  e  $\{S_2|r_1r_2\}$ .

É importante notar que o termo  $(C_i / R\alpha^{t_i})$  contém somente parâmetros relacionados com custo ( $C_i$ ), retorno ( $R$ ), valor de tempo ( $\alpha$ ) e prazo ( $t_i$ ), e o termo  $\{S_i|r_1r_2\}$  é associado com as relações probabilísticas entre as opções de *design* e os desempenhos de testes. Representam, portanto, dois grupos distintos de características do problema de teste em desenvolvimento.

Tabela 4.4 – Alternativas e Valores Esperados nos Pontos de Decisão  $W_i$  e  $Y_i$ 

Ponto de Decisão	Resultados de Teste Disponíveis	Alternativas	Valor Esperado da Alternativa
$W_1$ ou $Y_1$	+ <sub>1</sub> e + <sub>2</sub>	Lança $O_1$	$-C_1 + \{S_1   +_1 +_2\} R\alpha^{t_1}$
		Lança $O_2$	$-C_1 + \{S_2   +_1 +_2\} R\alpha^{t_1}$
		Abandona	0
$W_2$ ou $Y_2$	+ <sub>1</sub> e - <sub>2</sub>	Lança $O_1$	$-C_1 + \{S_1   +_1 -_2\} R\alpha^{t_1}$
		Lança $O_2$	$-C_1 + \{S_2   +_1 -_2\} R\alpha^{t_1}$
		Abandona	0
$W_3$ ou $Y_3$	- <sub>1</sub> e + <sub>2</sub>	Lança $O_1$	$-C_1 + \{S_1   -_1 +_2\} R\alpha^{t_1}$
		Lança $O_2$	$-C_1 + \{S_2   -_1 +_2\} R\alpha^{t_1}$
		Abandona	0
$W_4$ ou $Y_4$	- <sub>1</sub> e - <sub>2</sub>	Lança $O_1$	$-C_1 + \{S_1   -_1 -_2\} R\alpha^{t_1}$
		Lança $O_2$	$-C_1 + \{S_2   -_1 -_2\} R\alpha^{t_1}$
		Abandona	0

A ordem entre as probabilidades  $\{S_i | r_i r_j\}$  é determinada pelas relações da Equação 4.24, e analisando os valores esperados das alternativas em  $W_i$  ou  $Y_i$  na Tabela 4.4, as seguintes afirmações, em relação às alternativas ótimas em cada ponto de decisão  $W_i$  ou  $Y_i$  podem ser feitas:

- Se  $\{S_i | r_i r_j\} \geq \frac{C_1}{R\alpha^{t_1}}$ , então todos  $W_k$  e  $Y_l$  com  $\{S_n | r_m r_q\}$ , onde  $n = 1$  ou  $2$ ,  $m = 1$  ou  $2$  e  $q = 1$  ou  $2$ , maior que  $\{S_i | r_i r_j\}$ , devem lançar a opção de *design* correspondente, pois o seu valor esperado será maior que zero.
- Por outro lado, se  $\{S_i | r_i r_j\} \leq \frac{C_1}{R\alpha^{t_1}}$ , então todos  $W_k$  e  $Y_l$  com  $\{S_n | r_m r_q\}$ , onde  $n = 1$  ou  $2$ ,  $m = 1$  ou  $2$  e  $q = 1$  ou  $2$ , menor que  $\{S_i | r_i r_j\}$ , não devem lançar a opção de *design* correspondente, pois o seu valor esperado será menor que zero.

Estas conclusões mostram a importância de conhecer o valor do termo  $(C_1 / R\alpha^{t_i})$  e da sua relação com as probabilidades  $\{S_i | r_i r_j\}$ . A Tabela 4.5 apresenta os cinco possíveis posicionamentos, representados pelas colunas 1 até 5, do termo  $(C_1 / R\alpha^{t_i})$  em relação às  $\{S_i | r_i r_j\}$  e mostra a alternativa ótima e seu valor esperado para cada ponto de decisão.

Por exemplo, quando  $\{S_1 | +_1 +_2\} \leq \frac{C_1}{R\alpha^{t_i}}$  (coluna 1), então todas  $\{S_i | r_i r_j\}$ s são menores que  $(C_1 / R\alpha^{t_i})$ , conseqüentemente, em todos os pontos de decisão  $\underline{W}_i$  ou  $\underline{Y}_i$ , o valor esperado de lançamento é menor que zero. Portanto, a Tabela 4.5 mostra que a melhor alternativa é “abandona”.

Como outro exemplo, suponha-se que o posicionamento do  $(C_1 / R\alpha^{t_i})$  é

$$\{S_1 | -_1 +_2\} = \{S_2 | +_1 -_2\} \leq \frac{C_1}{R\alpha^{t_i}} \leq \{S_1 | +_1 -_2\} = \{S_2 | -_1 +_2\} \quad (\text{Equação 4.35})$$

Isto corresponde à coluna 3 da Tabela 4.5. Analisa-se a seguir a melhor alternativa em cada ponto de decisão  $\underline{W}_i$  ou  $\underline{Y}_i$ ,  $i = 1, 2, 3$  e  $4$  da coluna 3. Começando com os pontos  $\underline{W}_1$  e  $\underline{Y}_1$ .

O valor esperado de “lança  $O_1$ ” ( $VELO_1$ ), nos pontos  $\underline{W}_1$  e  $\underline{Y}_1$ , é positivo. Isto é mostrado a seguir. A Tabela 4.4 mostra que nos pontos de decisão  $\underline{W}_1$  e  $\underline{Y}_1$ :

$$VELO_1 = -C_1 + \{S_1 | +_1 +_2\} R\alpha^{t_i} = -C_1 + \{S_2 | +_1 +_2\} R\alpha^{t_i} = VELO_2,$$

e, de acordo com a ordem entre as  $\{S_i | r_i r_j\}$ , Equação 4.24, e o posicionamento do  $(C_1 / R\alpha^{t_i})$  na coluna 3 acima, pode-se concluir que:

$$\{S_1 | +_1 +_2\} = \{S_2 | +_1 +_2\} \geq \{S_1 | +_1 -_1\} \geq \frac{C_1}{R\alpha^{t_i}};$$

então,  $VELO_1 = VELO_2 \geq 0$ .

Nos pontos  $\underline{W}_2$  e  $\underline{Y}_2$ , os valores esperados de lançamento (Tabela 4.4),  $VELO_1$  e  $VELO_2$ , são:

$$VELO_1 = -C_1 + \{S_1|_{+1 -2}\}R\alpha^{t_1}, e$$

$$VELO_2 = -C_1 + \{S_2|_{+1 -2}\}R\alpha^{t_1}.$$

Então, dada a Equação 4.35, conclui-se que  $VELO_1 \geq 0$  e  $VELO_2 \leq 0$ , portanto, a melhor alternativa nos pontos  $\underline{W}_2$  e  $\underline{Y}_2$ , é “lança  $O_1$ ”.

Nos pontos  $\underline{W}_3$  e  $\underline{Y}_3$ , os valores esperados de lançamento, de acordo com a Tabela 4.4, são:

$$VELO_1 = -C_1 + \{S_1|_{-1 +2}\}R\alpha^{t_1}, e$$

$$VELO_2 = -C_1 + \{S_1|_{-1 +2}\}R\alpha^{t_1}.$$

Aplicando a Equação 4.35, pode-se concluir que  $VELO_1 \leq 0$  e  $VELO_2 \geq 0$ , portanto, a melhor alternativa nos pontos  $\underline{W}_3$  e  $\underline{Y}_3$ , é “lança  $O_2$ ”.

Nos pontos  $\underline{W}_4$  e  $\underline{Y}_4$ , os valores esperados de lançamentos, de acordo com a Tabela 4.4, são:

$$VELO_1 = -C_1 + \{S_1|_{-1 -2}\}R\alpha^{t_1}, e$$

$$VELO_2 = -C_1 + \{S_2|_{-1 -2}\}R\alpha^{t_1}$$

Aplicando as Equação 4.35 e a Equação 4.24, pode-se afirmar que:

$$\{S_1|_{-1 -2}\} = \{S_2|_{-1 -2}\} \leq \frac{C_1}{R\alpha^{t_1}}.$$

Conseqüentemente,  $VELO_1 = VELO_2 \leq 0$ , e, portanto, a melhor alternativa nos pontos  $\underline{W}_4$  e  $\underline{Y}_4$ , é “abandona”. Com esse exemplo, as alternativas ótimas da coluna 3 da Tabela 4.5 são identificadas.

Utilizando raciocínios análogos, identifica-se a melhor alternativa em cada ponto de decisão para cada posicionamento (coluna) do  $\frac{C_1}{R\alpha^t}$  em relação às  $\{S_i | r_i r_j\}$  na Tabela 4.5.

#### 4.3.2 – Alternativa Ótima no Ponto de Decisão $\underline{V}_i, i=1$ e $2$

$\underline{V}_1$  e  $\underline{V}_2$  são pontos de decisões subseqüentes à decisão de Testar  $O_1$ , Figura 4.1, e, nesses pontos, o projetista dispõe o resultado de teste da opção de *design*  $O_1$ . No ponto  $\underline{V}_1$  o resultado de teste é positivo ( $+_1$ ), e, no ponto  $\underline{V}_2$ , o resultado é negativo ( $-_1$ ). As alternativas disponíveis nesses dois pontos são: Lança  $O_1$ , Lança  $O_2$ , Testa  $O_2$ , ou Abandona. A alternativa Testa  $O_2$  gera um resultado de teste, “ $+_2$ ” ou “ $-_2$ ”, que exige uma outra decisão representada por pontos  $\underline{W}_1, \underline{W}_2, \underline{W}_3$  e  $\underline{W}_4$ . O objetivo desta subseção é determinar a alternativa ótima em  $\underline{V}_i$  e identificar as condições que a afeta. Analisa-se, inicialmente, o ponto  $\underline{V}_1$  e depois o ponto  $\underline{V}_2$ .

##### *Alternativa ótima no ponto de decisão $\underline{V}_1$*

A determinação da alternativa ótima no  $\underline{V}_1$  exige o cálculo dos valores esperados das alternativas de Lança  $O_1$  ( $VELO_1$ ), Lança  $O_2$  ( $VELO_2$ ), Testa  $O_2$  ( $VE_{TO_2}$ ) e Abandona ( $VE_{Ab}$ ). As equações de  $VELO_1$ ,  $VELO_2$  e  $VE_{Ab}$  são relativamente simples e são apresentadas a seguir:

$$VELO_1 = -C_1 + \{S_1 | +_1\} R\alpha^t, \quad (\text{Equação 4.36})$$

$$VELO_2 = -C_1 + \{S_2 | +_1\} R\alpha^t, \text{ e} \quad (\text{Equação 4.37})$$

$$VE_{Ab} = 0, \quad (\text{Equação 4.38})$$

Tabela 4.5 – Alternativa Ótima e seu Valor Esperado em  $\underline{W}_i$  ou  $\underline{Y}_i$ 

Ponto de Decisão	Posição do $(C_1 / R\alpha^i)$ em relação às $\{S_i / r_i r_j\}$				
	5	4	3	2	1
	$\frac{C_1}{R\alpha^i} \leq$	$\frac{\{S_1 -1-2\}}{\{S_2 -1-2\}} \leq \frac{C_1}{R\alpha^i} \leq$	$\frac{\{S_1 -1+2\}}{\{S_2 +1-2\}} \leq \frac{C_1}{R\alpha^i} \leq$	$\frac{\{S_1 +1-2\}}{\{S_2 -1+2\}} \leq \frac{C_1}{R\alpha^i} \leq$	$\frac{\{S_1 +1+2\}}{\{S_2 +1+2\}} \leq \frac{C_1}{R\alpha^i}$
$\underline{W}_1$ ou $\underline{Y}_1$	Lança $O_1$ ou $O_2$ $VE^* = \{S_1 +1+2\} / R\alpha^i - C_1$	Lança $O_1$ ou $O_2$ $VE^* = \{S_1 +1+2\} / R\alpha^i - C_1$	Lança $O_1$ ou $O_2$ $VE^* = \{S_1 +1+2\} / R\alpha^i - C_1$	Lança $O_1$ ou $O_2$ $VE^* = \{S_1 +1+2\} / R\alpha^i - C_1$	Abandona $VE^* = 0$
$\underline{W}_2$ ou $\underline{Y}_2$	Lança $O_1$ $VE^* = \{S_1 +1-2\} / R\alpha^i - C_1$	Lança $O_1$ $VE^* = \{S_1 +1-2\} / R\alpha^i - C_1$	Lança $O_1$ $VE^* = \{S_1 +1-2\} / R\alpha^i - C_1$	Abandona $VE^* = 0$	Abandona $VE^* = 0$
$\underline{W}_3$ ou $\underline{Y}_3$	Lança $O_2$ $VE^* = \{S_2 -1+2\} / R\alpha^i - C_1$	Lança $O_2$ $VE^* = \{S_2 -1+2\} / R\alpha^i - C_1$	Lança $O_2$ $VE^* = \{S_2 -1+2\} / R\alpha^i - C_1$	Abandona $VE^* = 0$	Abandona $VE^* = 0$
$\underline{W}_4$ ou $\underline{Y}_4$	Lança $O_1$ ou $O_2$ $VE^* = \{S_1 -1-2\} / R\alpha^i - C_1$	Abandona $VE^* = 0$	Abandona $VE^* = 0$	Abandona $VE^* = 0$	Abandona $VE^* = 0$

Entretanto, o cálculo do valor esperado da alternativa Testa  $O_2$  ( $VE_{TO_2}$ ) é bem mais complexo, e as próximas páginas são dedicadas a essa tarefa. Somente depois de ter a equação do  $VE_{TO_2}$  elaborada é que será possível identificar a alternativa ótima no  $V_1$ , comparando os valores esperados  $VE_{LO_1}$ ,  $VE_{LO_2}$ ,  $VE_{TO_2}$  e  $VE_{Ab}$ .

A complexidade na determinação do  $VE_{TO_2}$  deve-se ao fato de que este valor esperado depende não só do resultado de teste do  $O_2$ , mas também das decisões tomadas nos pontos  $W_1$  e  $W_2$ . Por exemplo, se o projetista adotasse a seguinte estratégia, após testar o  $O_2$ : no caso de o resultado de Testa  $O_2$  ser positivo (+<sub>2</sub>), a decisão no  $W_1$  seria Lança  $O_1$ ; e no caso de o resultado de Testa  $O_2$  ser negativo (-<sub>2</sub>), a decisão no  $W_2$  seria Abandona. Esta estratégia é denominada de  $E3$  (Tabela 4.6). O valor esperado da Testa  $O_2$ , adotando a estratégia  $E3$ , seria:

$$VE_{TO_2}(E3) = -C_i + \{+2|+1\} \left[ -C_l + \{S_1|+1+2\} R \alpha^{t_i} \right] \alpha^{t_i}$$

Onde, além dos parâmetros  $C_i$ ,  $R$  e  $t_i$ , os outros são:

$C_i$  = Custo de realizar o teste,

$t_i$  = duração do teste,

$\{+2|+1\}$  = probabilidade de obter "+<sub>2</sub>" dado que ocorreu "+<sub>1</sub>".

Outra estratégia possível do projetista, após testar o  $O_2$ , é a  $E4$  (Tabela 4.6): no caso "+<sub>2</sub>", Lança  $O_2$ ; e o caso "-<sub>2</sub>", Lança  $O_1$ . O valor esperado da Testa  $O_2$  com a estratégia  $E4$  é:

$$VE_{TO_2}(E4) = -C_i + \{+2|+1\} \left[ -C_l + \{S_2|+1+2\} R \alpha^{t_i} \right] \alpha^{t_i} \\ + \{-2|+1\} \left[ -C_l + \{S_1|+1-2\} R \alpha^{t_i} \right] \alpha^{t_i}.$$

As possíveis estratégias da alternativa Testa  $O_2$ , no ponto de decisão  $V_1$ , são nove. A Tabela 4.6 apresenta estas nove estratégias da alternativa Testa  $O_2$  e os respectivos valores esperados. Essas estratégias são denominadas de  $E1$  a  $E9$ , sendo as estratégias  $E3$  e  $E4$  já descritas acima. Todos os valores esperados da Tabela 4.6 têm três componentes: o custo de testar  $O_2$  ( $C_i$ ), e os dois valores esperados das decisões tomadas nos pontos  $W_1$  e  $W_2$  multiplicados pelas respectivas probabilidades de ocorrência ( $\{+2|+1\}$  e  $\{-2|+1\}$ ).

O valor esperado da alternativa Testar  $O_2$ , no ponto  $\underline{V}_1$ , deve ser então o maior valor esperado entre as nove estratégias da Tabela 4.6. A definição desta melhor estratégia depende principalmente da relação entre  $C_1 / R\alpha^{t_1}$  e as probabilidades  $\{S_i | r_i r_j\}$  como é mostrada a seguir.

Como foram mostrados na Tabela 4.5, os possíveis posicionamentos do  $(C_1 / R\alpha^{t_1})$  entre as  $\{S_i | r_i r_j\}$  são cinco. No primeiro caso (coluna 1 da Tabela 4.5), o  $(C_1 / R\alpha^{t_1})$  é maior que todas  $\{S_i | r_i r_j\}$ , isto é:

$$\{S_i | r_i r_j\} \leq C_1 / R\alpha^{t_1},$$

para todos  $S_i$ ,  $r_i$  e  $r_j$ .

Dada a ordem entre as  $\{S_i | r_i r_j\}$ , (Equação 4.24), e analisando os valores esperados da Tabela 4.6, pode-se concluir que as estratégias  $E1$  até  $E8$  têm valores esperados menor, ou, no máximo, igual a  $(-C_1)$ . Portanto, a melhor estratégia é a  $E9$ : abandonar tanto no  $\underline{W}_1$  como no  $\underline{W}_2$ .

No segundo caso (coluna 2, da Tabela 4.5), o posicionamento do  $(C_1 / R\alpha^{t_1})$  em relação às  $\{S_i | r_i r_j\}$  é:

$$\{S_1 | +_1 -_2\} = \{S_2 | -_1 +_2\} \leq \frac{C_1}{R\alpha^{t_1}} \leq \{S_1 | +_1 +_2\} = \{S_2 | +_1 +_2\}.$$

Neste caso, as melhores estratégias são  $E3$  e  $E6$ , que têm o mesmo valor esperado. Para chegar a esta conclusão, compara-se primeiramente os valores esperados das estratégias  $E1$  e  $E3$ . Nota-se que os componentes sob  $\underline{W}_1$  dessas duas estratégias são iguais, mas o componente sob  $\underline{W}_2$  da estratégia  $E1$  é negativo, pois o termo  $(C_1 / R\alpha^{t_1})$  é maior que  $\{S_1 | +_1 -_2\}$ , e o da  $E3$  é zero. Portanto, a estratégia  $E3$  é melhor. O mesmo raciocínio pode ser usado para comparar outras estratégias, contra  $E3$  ou  $E6$ , para chegar a idêntica conclusão.

Tabela 4.6 – Estratégias da Alternativa Testa  $O_2$  no  $V_1$ 

Estratégia		Teste	Ponto de decisão $\underline{W}_1$	Ponto de decisão $\underline{W}_2$
E1	Decisão		Lança $O_1$	Lança $O_1$
	VETO <sub>2</sub>	$-C_i$	$+ \{+2 +1\} [-C_i + \{S_1 +1+2\} R\alpha^{t_i}] \alpha^{t_i}$	$+ \{-2 +1\} [-C_i + \{S_1 +1-2\} R\alpha^{t_i}] \alpha^{t_i}$
E2	Decisão		Lança $O_1$	Lança $O_2$
	VETO <sub>2</sub>	$-C_i$	$+ \{+2 +1\} [-C_i + \{S_1 +1+2\} R\alpha^{t_i}] \alpha^{t_i}$	$+ \{-2 +1\} [-C_i + \{S_2 +1-2\} R\alpha^{t_i}] \alpha^{t_i}$
E3	Decisão		Lança $O_1$	Abandona
	VETO <sub>2</sub>	$-C_i$	$+ \{+2 +1\} [-C_i + \{S_1 +1+2\} R\alpha^{t_i}] \alpha^{t_i}$	$+ \{-2 +1\} [0]$
E4	Decisão		Lança $O_2$	Lança $O_1$
	VETO <sub>2</sub>	$-C_i$	$+ \{+2 +1\} [-C_i + \{S_2 +1+2\} R\alpha^{t_i}] \alpha^{t_i}$	$+ \{-2 +1\} [-C_i + \{S_1 +1-2\} R\alpha^{t_i}] \alpha^{t_i}$
E5	Decisão		Lança $O_2$	Lança $O_2$
	VETO <sub>2</sub>	$-C_i$	$+ \{+2 +1\} [-C_i + \{S_2 +1+2\} R\alpha^{t_i}] \alpha^{t_i}$	$+ \{-2 +1\} [-C_i + \{S_2 +1-2\} R\alpha^{t_i}] \alpha^{t_i}$
E6	Decisão		Lança $O_2$	Abandona
	VETO <sub>2</sub>	$-C_i$	$+ \{+2 +1\} [-C_i + \{S_2 +1+2\} R\alpha^{t_i}] \alpha^{t_i}$	$+ \{-2 +1\} [0]$
E7	Decisão		Abandona	Lança $O_1$
	VETO <sub>2</sub>	$-C_i$	$+ \{+2 +1\} [0]$	$+ \{-2 +1\} [-C_i + \{S_1 +1-2\} R\alpha^{t_i}] \alpha^{t_i}$
E8	Decisão		Abandona	Lança $O_2$
	VETO <sub>2</sub>	$-C_i$	$+ \{+2 +1\} [0]$	$+ \{-2 +1\} [-C_i + \{S_2 +1-2\} R\alpha^{t_i}] \alpha^{t_i}$
E9	Decisão		Abandona	Abandona
	VETO <sub>2</sub>	$-C_i$	$+ \{+2 +1\} [0]$	$+ \{-2 +1\} [0]$

No terceiro caso (coluna 3 da Tabela 4.5), o posicionamento do  $(C_i / R\alpha^{t_i})$  é:

$$\{S_1|-1+2\} = \{S_2|+1-2\} \leq \frac{C_i}{R\alpha^{t_i}} \leq \{S_1|+1-2\} = \{S_2|-1+2\}.$$

Neste caso, as melhores estratégias são E1 e E4. Pois, para estas duas estratégias, tanto o componente sob  $\underline{W}_1$  como o sob  $\underline{W}_2$ , na Tabela 4.6 são positivos, ou, no mínimo, zero.

No quarto caso, o posicionamento do  $(C_1 / R\alpha^{t_1})$  é:

$$\{S_1|-1-2\} = \{S_2|-1-2\} \leq \frac{C_1}{R\alpha^{t_1}} \leq \{S_1|-1+2\} = \{S_2|+1-2\}.$$

Neste caso, todos os componentes sob  $\underline{W}_1$  ou  $\underline{W}_2$ , da Tabela 4.6, são negativos. Mas como

$$\{S_1|+1+2\} = \{S_2|+1+2\} \geq \{S_1|+1-2\} \geq \{S_2|+1-2\},$$

de acordo com Equação 4.24, pode-se concluir que as estratégias  $E1$  e  $E4$  têm maiores valores esperados que outras.

Finalmente, no quinto caso, o posicionamento do  $(C_1 / R\alpha^{t_1})$  é:

$$\frac{C_1}{R\alpha^{t_1}} \leq \{S_1|-1-2\} = \{S_2|-1-2\}.$$

Como as probabilidades  $\{S_1|-1-2\}$  e  $\{S_2|-1-2\}$  não constam nos pontos de decisão  $\underline{W}_1$  e  $\underline{W}_2$ , a conclusão do quarto caso se aplica aqui também.

Estes resultados são sumarizados na Tabela 4.7, onde  $VETO_2^*$  é o melhor valor esperado de Testar  $O_2$  no  $\underline{V}_1$ . A Tabela 4.7 mostra que as estratégias  $E2$ ,  $E5$ ,  $E7$  e  $E8$  não são as melhores em nenhum caso.

Agora que a equação do valor esperado ótimo da alternativa Testar  $O_2$  no ponto de decisão  $\underline{V}_1$  é determinada (Tabela 4.7), retoma-se a determinação da melhor alternativa no mesmo ponto de decisão. As alternativas disponíveis no  $\underline{V}_1$  são Lança  $O_1$ , Lança  $O_2$ , Abandona e Testa  $O_2$ , e os respectivos valores esperados são  $VELO_1$  (Equação 4.36),  $VELO_2$  (Equação 4.37),  $VE_{Ab}$  (Equação 4.38) e  $VETO_2^*$  (Tabela 4.7). A determinação da melhor alternativa no  $\underline{V}_1$  depende de comparação entre esses quatro valores esperados.

Tabela 4.7 – Valor Esperado Ótimo de Testar  $O_2$  no Ponto  $V_L$ 

Posicionamento do $(C_1 / R\alpha^{t_i})$	Estratégia Ótima <sup>(1)</sup>			$VE\theta_2^*$ no $V_L$
	Nº	$W_1$	$W_2$	
Caso 1	$E9$	Abandona	Abandona	$-C_i$
Caso 2	$E3$ e $E6$	Lança $O_1$ ou $O_2$	Abandona	$-C_i + \{+2 +1\} \left[ -C_1 + \{S_1 +1+2\} R\alpha^{t_i} \right] \alpha^{t_i}$
Caso 3	$E1$ e $E4$	Lança $O_1$ ou $O_2$	Lança $O_1$	$-C_i + \{+2 +1\} \left[ -C_1 + \{S_1 +1+2\} R\alpha^{t_i} \right] \alpha^{t_i}$ $+ \{-2 +1\} \left[ -C_1 + \{S_1 +1-2\} R\alpha^{t_i} \right] \alpha^{t_i}$
Casos 4 e 5	$E1$ e $E4$	Lança $O_1$ ou $O_2$	Lança $O_1$	$-C_i + \{+2 +1\} \left[ -C_1 + \{S_1 +1+2\} R\alpha^{t_i} \right] \alpha^{t_i}$ $+ \{-2 +1\} \left[ -C_1 + \{S_1 +1-2\} R\alpha^{t_i} \right] \alpha^{t_i}$

(1) A denominação de estratégia ótima é a da Tabela 4.6.

Um primeiro passo para essa determinação é comparar  $VELO_1$  e  $VELO_2$  no  $V_L$ . Como foi demonstrado, vide a Equação 4.27, que se  $f \geq 0,5$ , então  $\{S_1|+1\} \geq \{S_2|+1\}$ , conseqüentemente

$$VELO_1 = -C_1 + \{S_1|+1\} R\alpha^{t_i} \geq VELO_2 = -C_1 + \{S_2|+1\} R\alpha^{t_i} . \quad (\text{Equação 4.39})$$

Este resultado afirma que, no ponto de decisão  $V_L$ , a alternativa Lança  $O_1$  é sempre melhor que a de Lança  $O_2$  se o critério de comparação for de valor esperado e a confiabilidade de teste for igual ou maior que 50%. Isto implica que na determinação da melhor alternativa no  $V_L$  só é preciso analisar as alternativas Lança  $O_1$ , Testa  $O_2$  ou Abandona.

O segundo passo é, então, comparar essas três alternativas. Observa-se que o valor esperado da alternativa Abandona é sempre zero, portanto, só é preciso determinar os valores esperados das duas alternativas restantes. Essa comparação depende das relações entre  $(C_1 / R\alpha^{t_i})$ ,  $\{S_i|r_j\}$  e  $\{S_i|r_j\}$ , que podem ser classificadas em quatro casos.

O Caso 1 ocorre quando  $\{S_j|+_1+2\} \leq C_1 / R\alpha^{t_1}$ , e, de acordo com a Tabela 4.7, o melhor valor esperado da alternativa Testa  $O_2$  é

$$VET0_2^* = -C_1. \quad (\text{Equação 4.40})$$

O valor esperado da alternativa Lança  $O_1$  é:

$$VELO_1 = -C_1 + \{S_j|+_1\}R\alpha^{t_1}.$$

A Tabela 4.2 mostra que, para  $r_j = +_2$  e  $\xi < 1$ <sup>47</sup>, a seguinte inequação ocorre:

$$\{S_j|+_1+2\} > \{S_j|+_1\}.$$

Essa inequação e o posicionamento do  $(C_1 / R\alpha^{t_1})$  implicam que:

$$VELO_1 < 0. \quad (\text{Equação 4.41})$$

Os resultados Equação 4.40 e Equação 4.41 indicam que a melhor alternativa no  $V_L$ , neste Caso 1, é a de “Abandona”, pois o seu valor esperado de zero é maior que os de Lança  $O_1$  e Testa  $O_2$ .

O Caso 2 ocorre quando:

$$\{S_j|+_1\} \leq \frac{C_1}{R\alpha^{t_1}} \leq \{S_j|+_1+2\}. \quad (\text{Equação 4.42})$$

De acordo com a Tabela 4.2, a seguinte inequação é também verdadeira:

$$\{S_j|+_1-2\} \leq \{S_j|+_1\}, \quad (\text{Equação 4.43})$$

<sup>47</sup> Esta inequação significa que os dois *designs* são relacionados positivamente, isto é,  $\{S_j|F_i\} < \{S_j|S_i\}$ .

Isso implica que o melhor valor esperado da alternativa Testa  $O_2$ , de acordo com a Tabela 4.7 é:

$$VETO_2^* = -C_i + \{+2|+1\} \left[ -C_l + \{S_l|+1+2\} R\alpha^{t_l} \right] \alpha^{t_l}.$$

A Equação 4.42 implica também que o  $VELO_1 \leq 0$ , ou:

$$\{S_l|+1+2\} > \frac{\left( \frac{C_i}{\{+2|+1\}\alpha^{t_l}} \right) + C_l}{R\alpha^{t_l}}, \quad (\text{Equação 4.44})$$

Essa condição “exige” mais da  $\{S_l|+1+2\}$  para que a alternativa Testar  $O_2$  seja a melhor. Esta maior exigência se deve principalmente ao custo do teste  $C_i$ . Se a Equação 4.44 não é satisfeita, então a melhor alternativa, no Caso 2, seria “Abandona”.

O Caso 3 ocorre quando:

$$\{S_l|+1-2\} \leq \frac{C_l}{R\alpha^{t_l}} \leq \{S_l|+1\} \leq \{S_l|+1+2\}. \quad (\text{Equação 4.45})$$

A Equação 4.45 traz como consequência:

$$VELO_1 \geq 0$$

Portanto, dependendo de valores dos parâmetros  $C_i$ ,  $\{+2|+1\}$  e  $t_i$ , a alternativa ótima no  $V_l$  pode ser Lança  $O_1$  ou Testa  $O_2$ . Por exemplo, se o custo do teste for alto, então reduziria o  $VETO_2^*$  em relação ao  $VELO_1$ .

Finalmente, o Caso 4 ocorre quando:

$$\{S_2|+1-2\} \leq \frac{C_l}{R\alpha^{t_l}} \leq \{S_l|+1-2\}.$$

Então, segundo a Tabela 4.7, o melhor valor esperado da Testa  $O_2$  é:

$$VETO_2^* = -C_i + \{+2|-1\} \left[ -C_l + \{S_l|+1+2\} R\alpha^{t_l} \right] \alpha^{t_i} + \{-2|+1\} \left[ -C_l + \{S_l|+1-2\} R\alpha^{t_l} \right] \alpha^{t_i}.$$

Para facilitar a comparação entre  $VETO_2^*$  e  $VELO_1$ , um re-arranjo algébrico do  $VETO_2^*$  é necessário:

$$\begin{aligned} \{+2|+1\} \{S_l|+1+2\} &= \{+2|+1\} \left( \frac{\{+2|S_l\}}{\{+2|+1\}} \right) \{S_l|+1\}, e \\ &= \{+2|S_l\} \{S_l|+1\} \end{aligned}$$

analogamente, pode-se obter:

$$\{-2|+1\} \{S_l|+1-2\} = \{-2|S_l\} \{S_l|+1\}.$$

Substituindo essas expressões na equação de  $VETO_2^*$  chega-se a:

$$VETO_2^* = -C_i - C_l \alpha^{t_i} + \{S_l|+1\} R \alpha^{t_l + t_i},$$

Comparando com o  $VELO_1$

$$VELO_1 = -C_l + \{S_l|+1\} R \alpha^{t_l},$$

e substituindo, chega-se a:

$$VETO_2^* = -C_i + VELO_1 \cdot \alpha^{t_i}.$$

De onde, conclui-se que:

$$VELO_1 > VETO_2^*.$$

Isto é, no Caso 4, no qual o custo de lançamento é relativamente baixo, é mais vantagem Lançar  $O_1$ , em vez de testar o *design*  $O_2$ .

**Alternativa ótima no ponto de decisão  $V_2$**

No ponto  $V_2$ , as alternativas disponíveis são Lança  $O_1$ , Lança  $O_2$ , Testa  $O_2$  e Abandona. Os respectivos valores esperados são:

$$VELO_1 = -C_1 + \{S_1 | -1\} R\alpha^t, \quad (\text{Equação 4.46})$$

$$VELO_2 = -C_1 + \{S_2 | -1\} R\alpha^t, \quad (\text{Equação 4.47})$$

$$VE_{Ab} = 0, \quad (\text{Equação 4.48})$$

e o  $VE_{O_2}$  depende das decisões a serem tomadas nos pontos de decisão subseqüentes  $W_3$  e  $W_4$ . As nove possibilidades e seus respectivos valores esperados estão na Tabela 4.8.

A melhor estratégia da alternativa Testa  $O_2$  depende do posicionamento do  $(C_1 / R\alpha^t)$  em relação às probabilidades  $\{S_i | r_i r_j\}$ , situação análoga à do ponto  $V_1$ . Entretanto, como a maior probabilidade do tipo  $\{S_i | r_i r_j\}$  é a  $\{S_2 | -1 + 2\}$ , são somente três os possíveis posicionamentos do termo relações  $(C_1 / R\alpha^t)$  às  $\{S_i | r_i r_j\}$ . O procedimento de identificação da melhor estratégia em cada uma dessas posições é similar ao ponto de decisão  $V_1$  e os resultados estão na Tabela 4.9. Evidencia-se a mesma tendência no ponto  $V_1$  (Tabela 4.7) na qual um alto custo relativo de lançamento ( $C_1$ ) promove a estratégia de abandonar o projeto e um baixo custo relativo de  $C_1$  promove o lançamento na alternativa Testa  $O_2$  no  $V_2$ .

Uma vez identificada a equação do melhor valor esperado de Testar  $O_2$  (Tabela 4.9) e as equações de valor esperado de alternativas  $VELO_1$  (Equação 4.46),  $VELO_2$  (Equação 4.47) e  $VE_{Ab}$  (Equação 4.48), analisa-se agora a solução ótima no ponto  $V_2$ .

Tabela 4.8 – Estratégia da Alternativa Testa  $O_2$  no  $V_2$ 

Estratégia		Teste	Ponto de decisão $W_3$	Ponto de decisão $W_4$
E1	Decisão		Lança $O_1$	Lança $O_1$
	VETO $_2$	$-C_i$	$+ \{ +2   -1 \} \left[ -C_i + \{ S_1   +2 -1 \} R\alpha^{t_i} \right] \alpha^{t_i}$	$+ \{ -2   -1 \} \left[ -C_i + \{ S_1   -1 -2 \} R\alpha^{t_i} \right] \alpha^{t_i}$
E2	Decisão		Lança $O_1$	Lança $O_2$
	VETO $_2$	$-C_i$	$+ \{ +2   -1 \} \left[ -C_i + \{ S_1   +2 -1 \} R\alpha^{t_i} \right] \alpha^{t_i}$	$+ \{ -2   -1 \} \left[ -C_i + \{ S_2   -1 -2 \} R\alpha^{t_i} \right] \alpha^{t_i}$
E3	Decisão		Lança $O_1$	Abandona
	VETO $_2$	$-C_i$	$+ \{ +2   -1 \} \left[ -C_i + \{ S_1   +2 -1 \} R\alpha^{t_i} \right] \alpha^{t_i}$	$+ \{ -2   -1 \} \{ 0 \}$
E4	Decisão		Lança $O_2$	Lança $O_1$
	VETO $_2$	$-C_i$	$+ \{ +2   -1 \} \left[ -C_i + \{ S_2   +2 -1 \} R\alpha^{t_i} \right] \alpha^{t_i}$	$+ \{ -2   -1 \} \left[ -C_i + \{ S_1   -1 -2 \} R\alpha^{t_i} \right] \alpha^{t_i}$
E5	Decisão		Lança $O_2$	Lança $O_2$
	VETO $_2$	$-C_i$	$+ \{ +2   -1 \} \left[ -C_i + \{ S_2   +2 -1 \} R\alpha^{t_i} \right] \alpha^{t_i}$	$+ \{ -2   -1 \} \left[ -C_i + \{ S_2   -1 -2 \} R\alpha^{t_i} \right] \alpha^{t_i}$
E6	Decisão		Lança $O_2$	Abandona
	VETO $_2$	$-C_i$	$+ \{ +2   -1 \} \left[ -C_i + \{ S_2   +2 -1 \} R\alpha^{t_i} \right] \alpha^{t_i}$	$+ \{ -2   -1 \} \{ 0 \}$
E7	Decisão		Abandona	Lança $O_1$
	VETO $_2$	$-C_i$	$+ \{ +2   -1 \} \{ 0 \}$	$+ \{ -2   -1 \} \left[ -C_i + \{ S_1   -1 -2 \} R\alpha^{t_i} \right] \alpha^{t_i}$
E8	Decisão		Abandona	Lança $O_2$
	VETO $_2$	$-C_i$	$+ \{ +2   -1 \} \{ 0 \}$	$+ \{ -2   -1 \} \left[ -C_i + \{ S_2   -1 -2 \} R\alpha^{t_i} \right] \alpha^{t_i}$
E9	Decisão		Abandona	Abandona
	VETO $_2$	$-C_i$	$+ \{ +2   -1 \} \{ 0 \}$	$+ \{ -2   -1 \} \{ 0 \}$

O processo de análise é similar ao realizado para o ponto  $V_1$ , portanto, apresentam-se a seguir somente os resultados obtidos que dependem da posição do  $(C_i / R\alpha^{t_i})$  em relação às  $\{S_i | r_i r_j\}$ . São quatro casos, que cobrem os possíveis posicionamentos do  $(C_i / R\alpha^{t_i})$ .

O Caso 1 ocorre quando:

$$\{S_2 | -1 +2\} \leq (C_i / R\alpha^{t_i}).$$

(Equação 4.49)

A melhor alternativa no  $V_2$  é “Abandona”.

Tabela 4.9 – Valor Esperado Ótimo de Testar  $O_2$  no Ponto  $V_2$

Posicionamento do $(C_1 / R\alpha^t)$	Estratégia Ótima <sup>(1)</sup>			$VET O_2^*$ no $V_2$
	Nº(1)	$W_3$	$W_4$	
Caso 1: $\{S_2 -1+2\} \leq (C_1 / R\alpha^t)$	E9	Abandona	Abandona	$-C_i$
Caso 2: $\{S_1 -1+2\} \leq (C_1 / R\alpha^t) \leq \{S_2 -1+2\}$ ou $\{S_2 -1-2\} \leq (C_1 / R\alpha^t) \leq \{S_1 -1+2\}$	E6	Lança $O_1$	Abandona	$-C_i + \{+2 -1\} [-C_i + \{S_2 +2 -1\} R\alpha^t] \alpha^t$
Caso 3: $(C_1 / R\alpha^t) \leq \{S_1 -1-2\} = \{S_2 -1-2\}$	E4 ou E5	Lança $O_1$	Lança $O_1$ ou $O_2$	$-C_i + \{+2 -1\} [-C_i + \{S_2 +2 -1\} R\alpha^t] \alpha^t$ $+ \{-2 -1\} [-C_i + \{S_1 -1-2\} R\alpha^t] \alpha^t$

(1) A denominação de estratégia ótima é a da Tabela 4.8.

O Caso 2 ocorre quando:

$$\{S_2|-1\} \leq (C_1 / R\alpha^t) \leq \{S_2|-1+2\},$$

e a melhor alternativa pode ser tanto “Abandona” ou Testa  $O_2$ , dependendo do custo do teste  $C_i$ .

O Caso 3 ocorre quando:

$$\{S_1|-1-2\} \leq (C_1 / R\alpha^t) \leq \{S_2|-1\} \leq \{S_2|-1+2\},$$

e a melhor alternativa no  $V_2$ , pode ser Lança  $O_2$  ou Testa  $O_2$ , dependendo principalmente do custo do teste  $C_i$ ,  $\{+2|-1\}$  e outros parâmetros do problema.

Finalmente, o Caso 4 ocorre quando:

$$(C_1 / R\alpha^t) \leq \{S_1|-1-2\} \leq \{S_2|-1\},$$

e a melhor decisão no  $V_2$  é Lança  $O_2$ .

Os resultados da determinação de alternativas ótimas nos pontos de decisão  $V_1$  e  $V_2$  são sumarizados na Tabela 4.10. Analisando esses resultados, pode-se concluir que, quando o custo de lançamento ( $C_i$ ) for alto em relação à receita ( $R$ ) e às  $\{S_i|r_i r_j\}$ , a melhor decisão é “Abandona”. Ao reduzir gradualmente esse custo relativo, a alternativa ótima passa a ser Testa  $O_2$ . Essa mudança da alternativa ótima depende principalmente do custo de teste ( $C_i$ ). Ao reduzir ainda mais o custo relativo de lançamento, a alternativa Lança  $O_1$  ou  $O_2$ , isto é, usar diretamente o teste perfeito, torna-se preferida. Nota-se que, na Tabela 4.10, as mudanças de alternativas ótimas no  $V_1$  ocorrem com valores de  $(C_1 / R\alpha^t)$  maiores que as do  $V_2$ , e isto se deve ao resultado mais favorável de teste do  $O_1$ , que antecede aos pontos  $V_1$  e  $V_2$ .

Tabela 4.10 – Alternativas Ótimas nos Pontos de Decisão  $\underline{V}_1$  e  $\underline{V}_2$ 

Posição do $(C_1 / R\alpha^{t_1})$	Alternativa Ótima	
	Ponto $\underline{V}_1$	Ponto $\underline{V}_2$
$\{S_1 +1+2\} = \{S_2 +1+2\} \leq (C_1 / R\alpha^{t_1})$	Abandona	Abandona
$\{S_2 -1+2\} = \{S_1 +1-2\} \leq \{S_1 +1\} \leq (C_1 / R\alpha^{t_1}) \leq \{S_1 +1+2\}$	Abandona ou Testa $O_2$	Abandona
$\{S_2 -1+2\} = \{S_1 +1-2\} \leq (C_1 / R\alpha^{t_1}) \leq \{S_1 +1\} \leq \{S_1 +1+2\}$	Lança $O_1$ ou Testa $O_2$	Abandona
$\{S_2 +1-2\} = \{S_1 -1+2\} \leq \{S_2 -1\} \leq (C_1 / R\alpha^{t_1}) \leq \{S_2 -1+2\}$	Lança $O_1$	Abandona ou Testa $O_2$
$\{S_2 -1-2\} = \{S_1 -1-2\} \leq (C_1 / R\alpha^{t_1}) \leq \{S_2 -1\} \leq \{S_2 -1+2\}$	Lança $O_1$	Lança $O_2$ ou Testa $O_2$
$(C_1 / R\alpha^{t_1}) \leq \{S_2 -1-2\} = \{S_1 -1-2\}$	Lança $O_1$	Lança $O_2$

### 4.3.3 – Alternativa Ótima no Ponto de Decisão $\underline{U}$

Esta Seção determina a alternativa ótima no ponto de decisão  $\underline{U}$ , da árvore de decisão da Figura 4.1, utilizando o critério de valor esperado e em função dos valores dos parâmetros chaves do problema. Em particular, a Seção foca na análise do papel de influências entre os *designs*,  $\{S_i | S_j\}$ , na definição da alternativa ótima.

As alternativas possíveis, no ponto de decisão  $\underline{U}$ , são agrupadas em quatro categorias (Tabela 4.1):

1. Lançar um *design* (usando o teste perfeito), dependendo do resultado, lançar outro ou abandonar;

2. Avaliar um *design* usando o teste imperfeito; o resultado pode ser “positivo” (+) ou “negativo” (-). Observando este resultado, o projetista pode escolher entre: abandonar, lançar o *design* (usando o teste perfeito), ou avaliar outro com teste imperfeito e, dependendo do resultado deste, decidir lançar ou abandonar;
3. Avaliar os dois *designs*, com teste imperfeito, em paralelo, dependendo dos resultados, lança um ou abandona; ou
4. Abandona o projeto.

Diferentemente das seções anteriores, a abordagem de solução desta Seção é computacional: a alternativa ótima é determinada utilizando-se o Microsoft Excel como o meio de cálculo. A razão desta escolha se deve à complexidade analítica do problema no ponto de decisão  $\underline{U}$ . A comparação matemática das equações de valor esperado das alternativas torna-se complexa e os resultados de difícil generalização. A grande vantagem da abordagem computacional é a sua flexibilidade: a possibilidade de simular muitas combinações de valores de parâmetros do problema rapidamente. Entretanto, os resultados analíticos das seções anteriores são muito importantes para orientar e organizar as simulações realizadas no Excel.

O modelo computacional no Excel representa fielmente a árvore de decisão da Figura 4.1. Para cada conjunto de valores de parâmetros do problema, o modelo determina, em primeiro lugar, a melhor alternativa, comparando os valores esperados das alternativas, nos pontos de decisão  $\underline{W}_i$  e  $\underline{Y}_i$ ,  $i = 1, 2, 3$  e  $4$ , e  $\underline{Z}$  da árvore da Figura 4.1. Em seguida, o modelo determina a melhor alternativa nos pontos  $\underline{V}_1$  e  $\underline{V}_2$ . Finalmente, o modelo determina a melhor alternativa do ponto de decisão  $\underline{U}$ . As simulações são realizadas em quatro situações típicas, definidas pelas probabilidades, *a priori* de sucesso  $\{S_1\} = \{S_2\} = s$  e a confiabilidade do teste imperfeito  $\{+_1 | S_1\} = \{+_2 | S_2\} = f$  (Tabela 4.11). A Situação I retrata uma condição em que a chance de sucesso do *design* é alta (0,80) e o teste imperfeito tem um desempenho bom: confiabilidade de 90%. No outro extremo, a Situação IV retrata uma condição na qual a chance de sucesso é baixa (20%) e o teste possui uma baixa confiabilidade (60%). Lembrando que o menor valor do  $f$  é 50%. As Situações II e III retratam condições intermediárias. Na Situação II, a chance de sucesso é alta mas o teste imperfeito não é tão confiável. Na Situação III, ocorre o contrário: a chance de sucesso do *design* é baixa, mas o teste é bastante confiável. Essas quatro situações procuram representar as condições mais comuns que os projetistas enfrentam em desenvolvimento de produtos. Muitas outras condições são possíveis, mas espera-se que

uma análise dessas quatro situações típicas possa auxiliar no entendimento do problema em geral.

**Tabela 4.11 – As Quatro Situações Simuladas**

		Probabilidade de Sucesso (s)	
		0,80	0,2
Confiabilidade de Teste (f)	0,9	<b>Situação I</b>	<b>Situação III</b>
	0,6	<b>Situação II</b>	<b>Situação IV</b>

Para cada uma dessas quatro situações, o modelo computacional no Excel determina a alternativa ótima para uma série de combinações de valores dos parâmetros restantes do problema. Mais especificamente, os parâmetros mais relevantes são  $\{S_i | S_j\}$ ,  $(C_l / R\alpha^{tl})$  e  $C_i$ . O parâmetro  $(C_l / R\alpha^{tl})$  representa o custo de lançamento como uma fração do retorno do sucesso descontado pelo prazo  $t_l$ . O custo de realizar o teste imperfeito é  $C_i$ . A importância desses parâmetros é revelada pelas análises das seções anteriores. Por exemplo, o valor do  $(C_l / R\alpha^{tl})$  em relação às probabilidades  $\{S_i | r_i r_j\}$  define as alternativas ótimas nos pontos de decisão  $V_i$  (veja Tabela 4.10),  $W_i$ , e  $Y_i$  (veja Tabela 4.5).

Para facilitar a interpretação dos resultados computacionais, assume-se que o valor do  $R$  é igual a um, isto é:

$$R = 1,00$$

E como os custos  $C_i$  e  $C_l$  são menores que  $R$  (caso contrário, o projeto torna-se não lucrativo), pode-se concluir que:

$$C_i \leq 1,00 \text{ e } C_l \leq 1,00$$

Estas suposições não reduzem a capacidade de generalização dos resultados, pois os resultados são agora relativos. Com estas suposições, pode-se concluir que o valor esperado máximo teórico no ponto de decisão  $\underline{U}$ , é igual a um. Isto ocorre somente quando os custos e os prazos são zerados. Qualquer custo, ou demora, incorrido no projeto, tornaria este valor esperado menor que um.

Outros parâmetros são assumidos como constantes nessas simulações e os respectivos valores são:

$$\begin{aligned} C_i &= 0,05, \\ t_i &= 0,10 \text{ ano}, \\ t_l &= 4,0 \text{ anos, e} \\ \text{Taxa de desconto} &= 0,10, \end{aligned}$$

e conseqüentemente  $\alpha = 0,91$ . Adicionalmente, como nas seções anteriores, assume-se as seguintes relações:

$$\begin{aligned} \{S_1\} \leq \{S_1 | S_2\} &= a \\ \{S_2\} \leq \{S_2 | S_1\} &= a \\ f = \{+1 | S_1\} = \{+2 | S_2\} &\geq 0,5 \end{aligned}$$

Essas relações afirmam, em primeiro lugar, que os dois *designs* são relacionados positivamente, i.e, o sucesso de um torna o sucesso de outro mais provável; e, em segundo lugar, o resultado positivo do teste imperfeito é mais provável quando o *design* tiver sucesso.

A Tabela 4.12 apresenta os resultados de simulação para as quatro Situações. Em cada Situação, o valor da  $\{S_i | S_j\}$  varia de  $\{S_i\}$  até 1,00 e o valor do  $(C_l / R\alpha^{t_l})$  varia de zero até 0,88; este número é o valor do  $(C_l / R\alpha^{t_l})$  quando surge a alternativa ótima de abandonar o projeto nas Situações I e II. Valores acima de 0,88 implicam o abandono do projeto para todas as quatro Situações simuladas.

As seguintes observações e conclusões gerais resultam de uma análise dos resultados dessas quatro simulações da Tabela 4.12. As relações entre esses resultados de simulação com a literatura revisada, no Capítulo 2, é discutida na próxima seção (4.4).

Tabela 4.12 – Decisão Ótima e seu Valor Esperado no Ponto de Decisão  $U$ 

## Situação I

s	f	Ci	Cl	R	ti	tl	Taxa	Alfa
0,80	0,90	0,05		1,00	0,10	4,00	0,10	0,91

## Decisão Ótima no U

VE\*

	0,00	0,15	0,29	0,44	0,59	0,73	0,88	CI/R*alfa^tl
a	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	CI
0,80	Lseq 0,62	Lseq 0,51	Lseq 0,39	Tseq 0,28	Tseq 0,18	Tseq 0,09	Aban 0,00	
0,90	Lseq 0,58	Lseq 0,47	Lseq 0,36	Tseq 0,25	Tseq 0,16	Tseq 0,08	Aban 0,00	
0,95	Lseq 0,57	Lseq 0,45	Lseq 0,35	Lseq 0,25	Tseq 0,15	Tseq 0,07	Aban 0,00	
1,00	Lseq 0,55	Lseq 0,45	Lseq 0,35	Lseq 0,25	Lseq 0,15	Tseq 0,07	Aban 0,00	

## Situação II

s	f	Ci	Cl	R	ti	tl	Taxa	Alfa
0,80	0,60	0,05		1,00	0,10	4,00	0,10	0,91

## Decisão Ótima no U

VE\*

	0,00	0,15	0,29	0,44	0,59	0,73	0,88	CI/R*Alfa^tl
a	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	CI
0,80	Lseq 0,62	Lseq 0,51	Lseq 0,39	Lseq 0,28	Lseq 0,17	Lseq 0,05	Aban 0,00	
0,90	Lseq 0,58	Lseq 0,47	Lseq 0,36	Lseq 0,25	Lseq 0,15	Lseq 0,05	Aban 0,00	
0,95	Lseq 0,57	Lseq 0,45	Lseq 0,35	Lseq 0,25	Lseq 0,15	Lseq 0,05	Aban 0,00	
1,00	Lseq 0,55	Lseq 0,45	Lseq 0,35	Lseq 0,25	Lseq 0,15	Lseq 0,05	Aban 0,00	

## Situação III

s	f	Ci	Cl	R	ti	tl	Taxa	Alfa
0,20	0,90	0,05		1,00	0,10	4,00	0,10	0,91

## Decisão Ótima no U

VE\*

	0,00	0,15	0,29	0,44	0,59	0,73	0,88	CI/R*Alfa^tl
a	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	CI
0,20	Lseq 0,21	Tseq 0,08	Tseq 0,04	Aban 0,00	Aban 0,00	Aban 0,00	Aban 0,00	
0,40	Lseq 0,19	Tseq 0,06	Tseq 0,02	Aban 0,00	Aban 0,00	Aban 0,00	Aban 0,00	
0,60	Lseq 0,17	Tseq 0,05	Tseq 0,02	Aban 0,00	Aban 0,00	Aban 0,00	Aban 0,00	
0,80	Lseq 0,16	Tseq 0,05	Tseq 0,02	Aban 0,00	Aban 0,00	Aban 0,00	Aban 0,00	
1,00	Lseq 0,14	Tseq 0,05	Tseq 0,02	Aban 0,00	Aban 0,00	Aban 0,00	Aban 0,00	

## Situação IV

s	f	Ci	Cl	R	ti	tl	Taxa	Alfa
0,20	0,60	0,05		1,00	0,10	4,00	0,10	0,91

## Decisão Ótima no U

VE\*

	0,00	0,15	0,29	0,44	0,59	0,73	0,88	CI/R*Alfa^tl
a	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	CI
0,20	Lseq 0,21	Lseq 0,06	Aban 0,00	Aban 0,00	Aban 0,00	Aban 0,00	Aban 0,00	
0,40	Lseq 0,19	Lseq 0,04	Aban 0,00	Aban 0,00	Aban 0,00	Aban 0,00	Aban 0,00	
0,60	Lseq 0,17	Lseq 0,04	Aban 0,00	Aban 0,00	Aban 0,00	Aban 0,00	Aban 0,00	
0,80	Lseq 0,16	Lseq 0,04	Aban 0,00	Aban 0,00	Aban 0,00	Aban 0,00	Aban 0,00	
1,00	Lseq 0,14	Lseq 0,04	Aban 0,00	Aban 0,00	Aban 0,00	Aban 0,00	Aban 0,00	

- A alternativa ótima de testar seqüencialmente os *designs*, Tseq, é favorecida quando a confiabilidade do teste for alta, como nas Situações I e III. Quando a confiabilidade do teste é baixa, como nas Situações II e IV, a melhor alternativa é lançar diretamente o *design*, Lseq, sem realizar o teste imperfeito, quando o custo de lançamento é relativamente pequeno, ou abandonar o projeto (Aban). Lembrando que esses resultados são válidos para o custo de teste ( $C_i$ ) igual a 0,05, ou seja, 5% do  $R$ . Como é mostrado a seguir, uma redução do custo de teste pode tornar a alternativa Tseq ótima em certas condições.
- Quando a probabilidade, *a priori* de sucesso do *design* ( $s$ ) é relativamente pequena, isto ocorre nas Situações III e IV, o custo de lançamento ( $C_l$ ) acima de 0,1 (para Situação IV) ou 0,2 (para Situação III) causa o cancelamento do projeto (Aban), comparando com as Situações I e II, nas quais o custo de lançamento pode chegar até o valor de 0,5 antes de abandonar o projeto. Colocando em outros termos, quando a chance de sucesso do *design* é maior, o projetista tolera melhor um maior custo de lançamento, ou custo do teste perfeito, do que quando a chance de sucesso é menor.
- Quando o custo de lançamento ( $C_l$ ) é pequeno, geralmente, a melhor alternativa é Lançar seqüencialmente (Lseq). Com o aumento do  $C_l$ , a melhor alternativa passa a ser Testar seqüencialmente (Tseq) nas Situações I e III. Isto é, como o custo de lançamento é maior, vale a pena testar antes de tomar a decisão de lançamento. Nas Situações II e IV, como o teste não é tão confiável, não vale a pena testar e a melhor opção é abandonar. Por último, nas Situações I e III, um aumento adicional do  $C_l$  inviabiliza o projeto (Aban). O ponto de transição de uma alternativa ótima para outra depende de cada situação específica. Mas essa seqüência de alternativas ótimas: Lseq – Tseq – Aban, com o crescimento do custo de lançamento ( $C_l$ ) já foi observada nos pontos de decisão  $V_i$  (veja Tabela 4.10),  $W_i$  e  $Y_i$  (veja Tabela 4.5). Portanto, pode-se concluir que é uma propriedade desse tipo de modelo de teste.
- As simulações realizadas para as quatro Situações assumem que o custo do teste ( $C_i$ ) é fixo e é igual a 0,05 (5% do  $R$ ). Analisa-se, a seguir, o impacto da variação do  $C_i$  sobre a alternativa ótima nas Situações III e IV, que não apresentam a Tseq como alternativa ótima em nenhuma condição da Tabela 4.12. O objetivo é identificar o valor do  $C_i$  em que a alternativa ótima é Tseq. O valor do  $C_i$  variou de zero até 0,3 e o valor do  $C_l$  é fixado em 0,10. Pois um valor do  $C_l$  acima de 0,10 inviabiliza o projeto, de acordo com a Tabela 4.12. Os outros parâmetros são os mesmos da Situação IV. Os resultados da variação do  $C_i$  estão na Tabela 4.13. O que chama a atenção na Tabela 4.13 é a alternativa de Teste

Paralelo ( T// ), que se torna ótima quando o  $C_i$  for próximo de zero (mais exatamente, se for menor que 0,001). Simulações análogas realizadas em outras Situações (I e II) mostram os mesmos resultados: a alternativa T// deve ser empregada quando o custo de teste for menor que um milésimo do  $R$ . A Tabela 4.13 mostra também que a alternativa ótima é dominantemente Tseq se o  $C_i$  estiver entre 0,001 e 0,01. A alternativa ótima para  $C_i$  maior que 0,01 é Lseq e cujo valor esperado independe do custo de teste, pois essa alternativa não o emprega na sua execução.

**Tabela 4.13 – Variando Custo de Teste nas Situações III e IV**

**Situação III**

s	f	$C_i$	Cl	R	$t_i$	$t_l$	Taxa	Alfa
0,20	0,90		0,30	1,00	0,10	4,00	0,10	0,91

**Decisão Ótima no U**

VE\*

a	0,00	0,001	0,01	0,01	0,10	0,20	0,30	$C_i$
0,20	T//	T//	Tseq	Tseq	Aban	Aban	Aban	
	0,0775	0,0755	0,0685	0,0598	0,0000	0,0000	0,0000	
0,40	T//	Tseq	Tseq	Tseq	Aban	Aban	Aban	
	0,0656	0,0636	0,0567	0,0481	0,0000	0,0000	0,0000	
0,60	T//	Tseq	Tseq	Tseq	Aban	Aban	Aban	
	0,0537	0,0519	0,0450	0,0363	0,0000	0,0000	0,0000	
0,80	T//	Tseq	Tseq	Tseq	Aban	Aban	Aban	
	0,0472	0,0455	0,0405	0,0345	0,0000	0,0000	0,0000	
1,00	T//	Tseq	Tseq	Tseq	Aban	Aban	Aban	
	0,0591	0,0573	0,0522	0,0459	0,0000	0,0000	0,0000	

**Situação IV**

s	f	$C_i$	Cl	R	$t_i$	$t_l$	Taxa	Alfa
0,20	0,60		0,10	1,00	0,10	4,00	0,10	0,9091

**Decisão Ótima no U**

VE\*

a	0,000	0,001	0,005	0,010	0,100	0,200	0,300	$C_i$
0,20	T//	Tseq	Lseq	Lseq	Lseq	Lseq	Lseq	
	0,0587	0,0569	0,0566	0,0566	0,0566	0,0566	0,0566	
0,40	T//	Tseq	Tseq	Tseq	Lseq	Lseq	Lseq	
	0,0556	0,0538	0,0476	0,0425	0,0379	0,0379	0,0379	
0,60	T//	Tseq	Tseq	Tseq	Lseq	Lseq	Lseq	
	0,0525	0,0508	0,0446	0,0371	0,0366	0,0366	0,0366	
0,80	T//	Tseq	Tseq	Lseq	Lseq	Lseq	Lseq	
	0,0494	0,0477	0,0415	0,0366	0,0366	0,0366	0,0366	
1,00	T//	Tseq	Tseq	Lseq	Lseq	Lseq	Lseq	
	0,0463	0,0447	0,0384	0,0366	0,0366	0,0366	0,0366	

- Os resultados acima motivaram uma exploração mais sistemática de como diferentes combinações de  $C_l$  e  $C_i$  afetam a alternativa ótima no ponto  $\underline{U}$ . Para cada uma das Situações (I, II, III e IV), determina-se a alternativa ótima para diferentes valores de  $C_l$  e  $C_i$ , fixando-se os outros parâmetros:

$$t_i = 0,10 \text{ ano}$$

$$t_l = 4,0 \text{ anos e}$$

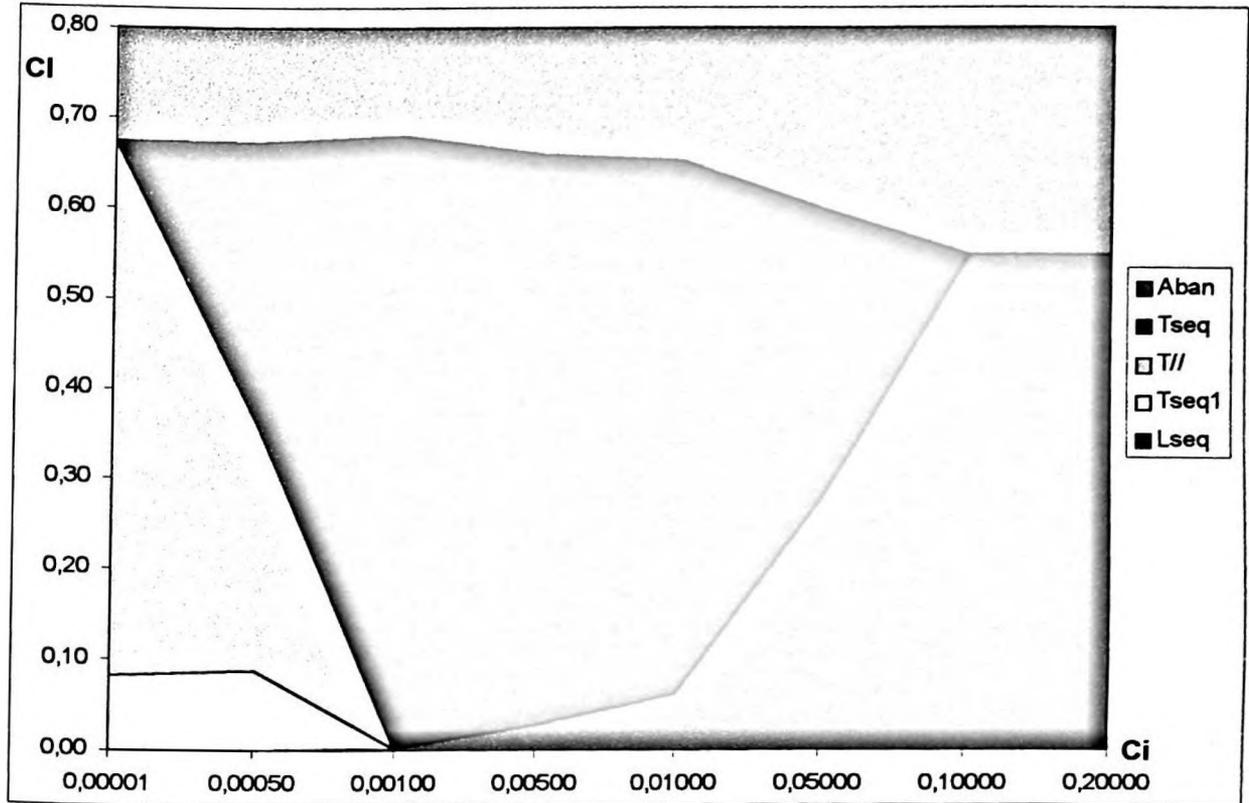
$$\text{Taxa de desconto} = 0,10$$

Nas Situações I e II, o valor da  $\{S_i | S_j\} = a = 0,9$  e, nas Situações III e IV, o valor da  $\{S_i | S_j\} = a = 0,3$ . Isto é, os dois *designs* são relacionados positivamente ( $a > s$ ). Os resultados dessas explorações estão na Figura 4.2. A escala da abscissa (eixo  $xx$ ), que representa  $C_i$ , é elaborada especialmente para destacar os valores do custo do teste menores que  $0,01$ . Pois, como foi mostrado anteriormente, nesta faixa de  $C_i$  a alternativa ótima é bastante sensível às variações de  $C_l$  e  $C_i$ . Cinco tipos de alternativas ótimas no  $\underline{U}$  são apresentadas: Abandona (Aban), Testa seqüencialmente (Tseq), Testa paralelamente (T//), Testa seqüencialmente 1 (Tseq-1) e Lança seqüencialmente (Lseq). Em três, das cinco alternativas, envolvem-se testes: Tseq, Tseq-1 e T//. A necessidade de separar as estratégias de testes seqüenciais em Tseq e Tseq-1 é motivada pelo comportamento distinto do Tseq-1 em relação às outras estratégias de Tseq. Isto pode ser claramente percebido na Situação I, na qual as áreas de Tseq-1 e Tseq, na Figura 4.2, não são adjacentes, a não ser no ponto  $C_l = 0$  e  $C_i = 0,001$ . A alternativa Tseq-1 segue a seguinte estratégia: testa o *design*  $O_1$ , se o resultado do teste for positivo (+), lança  $O_1$ ; se for negativo (-), lança  $O_2$ . A alternativa Tseq representa as outras estratégias de testes seqüenciais (veja Tabela 4.1). Analisando a Figura 4.2, algumas conclusões podem ser colocadas:

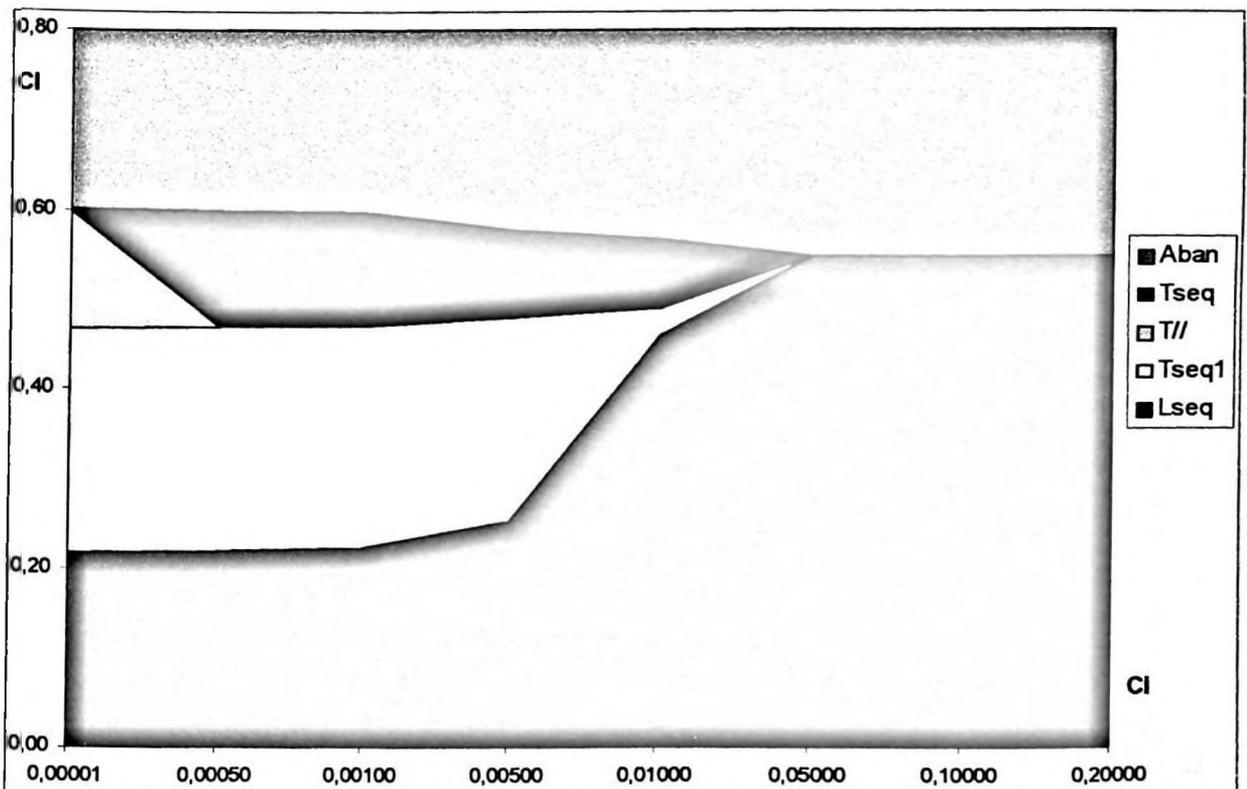
- (i) O espaço, representado pelas combinações de  $C_l$  e  $C_i$ , para as alternativas de teste (Tseq, Tseq-1 e T//) é maior na Situação I (alta chance de sucesso e boa confiabilidade de teste) e menor na Situação IV (pouca chance de sucesso e baixa confiabilidade de teste). O maior espaço para as alternativas de teste é determinado essencialmente pela alta confiabilidade nas Situações I e III. Este espaço para as alternativas de teste é inversamente proporcional ao valor do custo de teste  $C_i$ ; isto ocorre nas quatro situações simuladas;

- (ii) A situação que mais favorece a alternativa Lseq é a Situação II (boa chance de sucesso e baixa confiabilidade de teste). A alternativa Lseq representa a estratégia de testar o protótipo completo em condições reais, isto é, usar o teste perfeito. O método de tentativas e erros, utilizando protótipo completo, pode ser caracterizado como Lseq;
- (iii) A alternativa de T// deve ser empregada quando o custo de teste é muito baixo em relação à receita ( $R$ ). Na situação mais favorável para a alternativa T//, Situação III (pouca chance de sucesso mas alta confiabilidade de teste), o  $C_i$  máximo tolerável para realizar testes paralelos é  $0,005$  (0,5% da  $R$ );
- (iv) A variação da  $\{S_i | S_j\} = a$  afeta o espaço ocupado pela alternativa na Figura 4.2. Isto pode ser visualizado comparando-se os resultados da Situação I da Tabela 4.12 com os da Figura 4.2. Por exemplo, para  $C_i = 0,30$ ,  $C_i = 0,05$  e  $a = 0,9$ , a Figura 4.2 mostra que a melhor alternativa, para a Situação I, é Tseq. Entretanto, se a probabilidade  $\{S_i | S_j\} = a = 0,95$ , a Tabela 4.12 mostra que a alternativa ótima, da Situação I, muda para Lseq, e, conseqüentemente, o espaço da Tseq, na Figura 4.2, se reduz com o crescimento da  $\{S_i | S_j\} = a$ .
- valor esperado da alternativa ótima decresce com o aumento da  $\{S_i | S_j\} = a$  nas quatro situações da Tabela 4.12. Por exemplo, na Situação I, para  $C_i = 0,10$ , o valor esperado da Lseq passa de  $0,51$  ( $a = 0,80$ ) para  $0,45$  ( $a = 1,00$ ). Neste caso, a redução do valor esperado se deve ao decréscimo da  $\{S_2 | F_1\}$  com o aumento da  $a$ . Isto pode ser demonstrado analisando-se as equações de valores esperados das duas estratégias associadas à Lseq: LSeq-1 e LSeq-2. Estas são descritas na Tabela 4.1 que é parcialmente reproduzida abaixo.

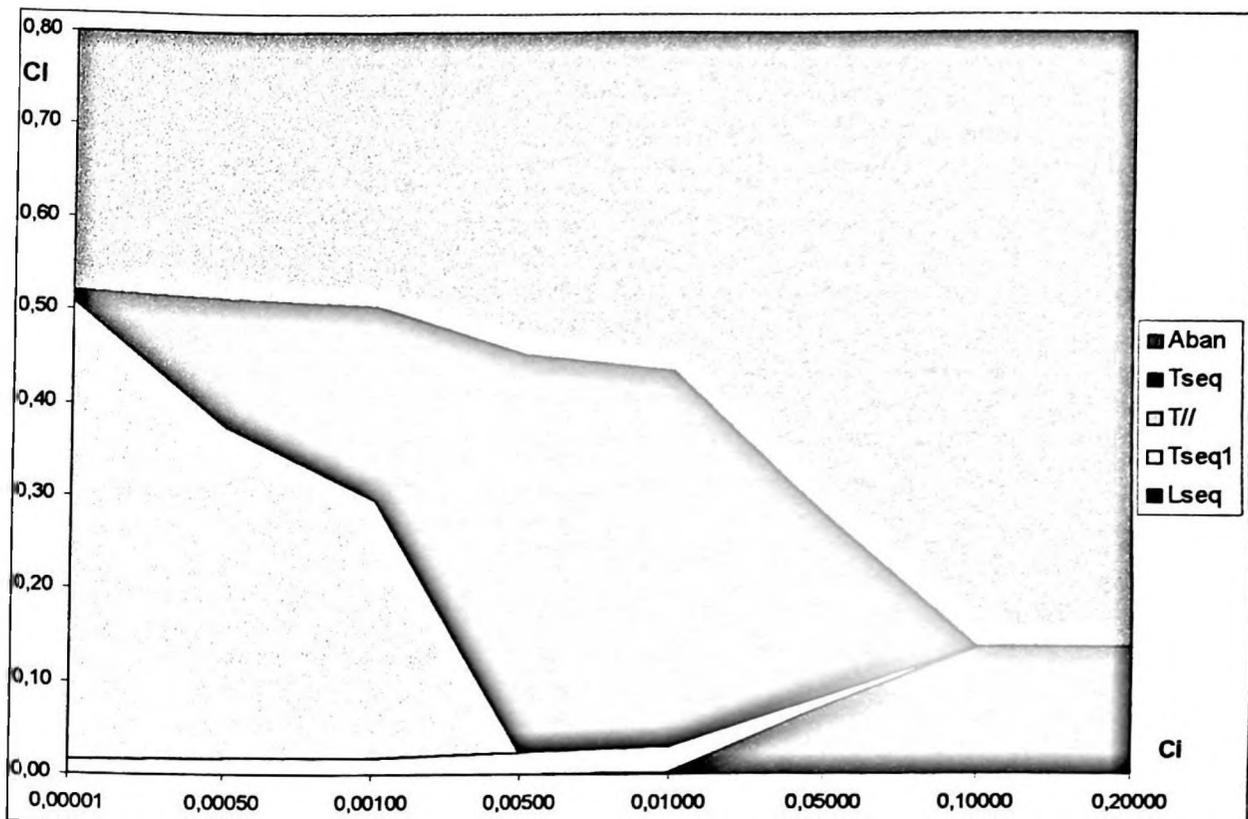
**Figura 4.2 – Alternativa Ótima no Ponto  $\underline{U}$  em Função de  $C_l$  e  $C_i$**   
**Situação I:  $s = 0,8$ ;  $f = 0,9$ ;  $a = 0,9$**



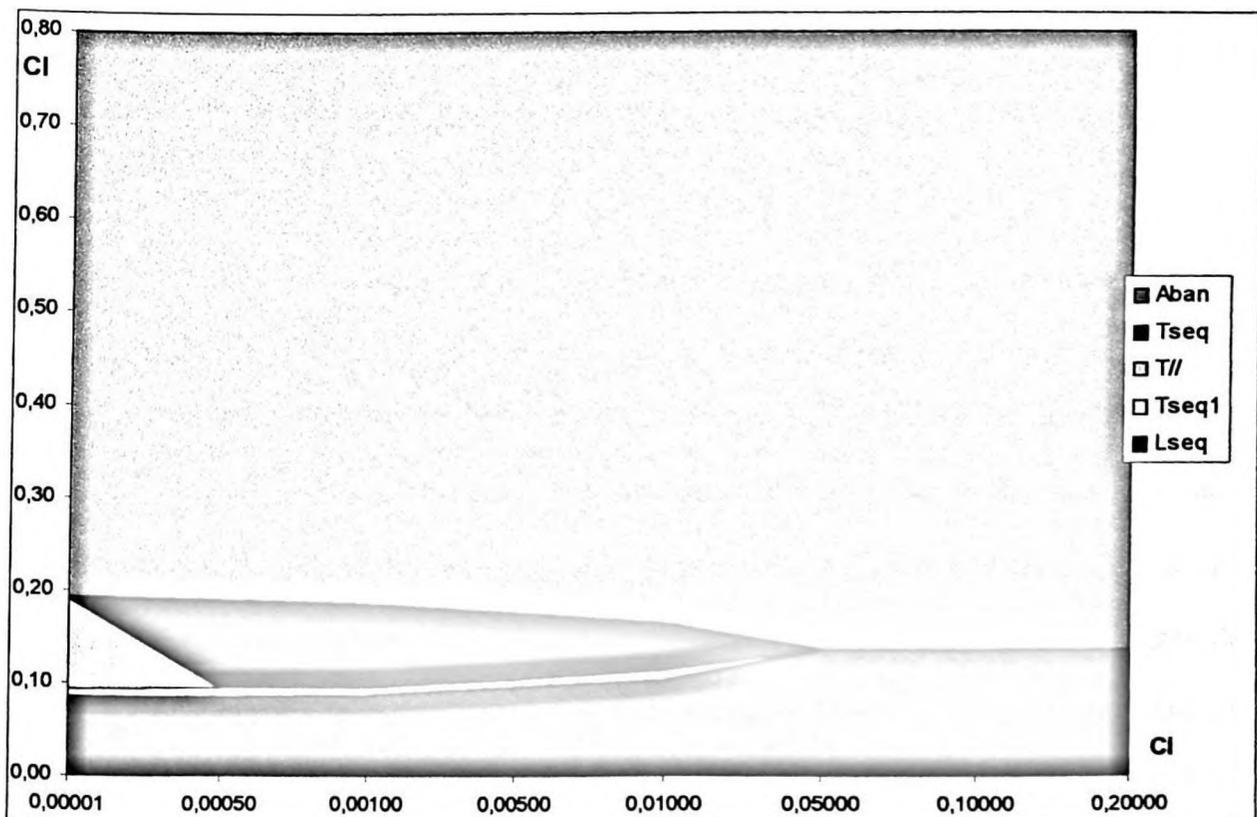
**Situação II:  $s = 0,8$ ;  $f = 0,6$ ;  $a = 0,9$**



**Figura 4.2 – (continuação)**  
**Situação III:  $s = 0,2$ ;  $f = 0,9$ ;  $a = 0,3$**



**Situação IV:  $s = 0,2$ ;  $f = 0,6$ ;  $a = 0,3$**



<i>1. Lançamento sequencial</i>	<i>Decisão no <math>\underline{U}</math></i>	<i>Resultado da decisão no <math>\underline{U}</math></i>	<i>Decisão no <math>\underline{Z}</math></i>
LSeq-1	Lança $O_i$	Sucesso	
		Fracasso	Lança $O_j$
LSeq-2	Lança $O_i$	Sucesso	
		Fracasso	Abandona

As equações de valores esperados destas duas estratégias são:

$$VELseq1 = -C_1 + sR\alpha^{t_1} + (1-s) \left[ \{S_2 | F_1\} R\alpha^{2t_1} - C_1\alpha^{t_1} \right] e$$

$$VELseq2 = -C_1 + sR\alpha^{t_1}$$

O único termo, dessas duas equações, afetado pela  $\{S_i | S_j\} = a$  é a  $\{S_2 | F_1\}$ , pois:

$$\{S_2 | F_1\} = (1 - \{S_1 | S_2\})\{S_2\} / (1 - \{S_1\}) e$$

a derivada da  $\{S_2 | F_1\}$  em relação a  $\{S_i | S_j\} = a$  é negativa. Isto é, se o lançamento do *design*  $O_1$  fracassar ( $F_1$ ), a chance de sucesso do  $O_2$  diminui quando os dois *designs* são relacionados mais positivamente (um aumento da probabilidade  $\{S_i | S_j\} = a$ ). Entretanto, um aumento da  $\{S_i | S_j\} = a$  não implica necessariamente uma redução do valor esperado da alternativa ótima. Por exemplo, ao variar o custo de teste ( $C_i$ ) e a  $\{S_i | S_j\} = a$  na Situação III, os valores esperados de  $T//$  e  $Tseq$  aumentam quando a  $\{S_i | S_j\} = a$  passa de 0,80 para 1,00 (Tabela 4.13). Esses aumentos são causados por mudança de alternativas ótimas nos pontos de decisão  $\underline{V}_1$  e  $\underline{V}_2$ . A Tabela 4.14 mostra em detalhes essas mudanças para

a coluna  $C_i = 0,01$  da Situação III (Tabela 4.13). Lembrando que a equação do valor esperado da Tseq (VETseq) é:

$$VETseq = -C_i + \{+1\}VE^*(V_1) + \{-1\}VE^*(V_2)$$

Onde  $VE^*(V_i)$ ,  $i = 1$  ou  $2$  é o valor esperado ótimo no ponto  $V_i$ . As probabilidades  $\{+1\}$  e  $\{-1\}$  não dependem da  $\{S_1 | S_2\} = a$ . Portanto basta analisar a influência da  $\{S_1 | S_2\}$  em  $VE^*(V_i)$ ,  $i = 1$  ou  $2$ . Para  $\{S_1 | S_2\} = a = 0,6$ , a alternativa ótima no  $V_1$  é Lança  $O_1$  e seu valor esperado é **0,1612** (em negrito) e a alternativa ótima no  $V_2$  é Testa  $O_2$  com um valor esperado de **-0,0076** (em negrito). Para  $a = 0,7$ , a alternativa ótima do  $V_2$  passa a ser “Abandona”. Nota que seu valor esperado foi reduzido de **-0,0076** para **-0,0100**. A partir do  $a = 0,9$ , a alternativa ótima no  $V_1$  passa a ser Testa  $O_2$  e seu valor esperado, no  $V_1$ , é crescente, com o aumento da  $\{S_1 | S_2\}$  e esta é a causa do crescimento do valor esperado da Tseq no ponto  $U$ .

Tabela 4.14 – Estratégia Ótima em Função da Influência entre *Designs*

$\{S_1   S_2\}$	0,60		0,70		0,80		0,90		1,00	
Ponto	V1	V2								
Alternativa	VE	VE								
Lança $O_1$	<b>0,1612</b>	-0,2889	<b>0,1612</b>	-0,2889	<b>0,1612</b>	-0,2889	0,1612	-0,2889	0,1612	-0,2889
Lança $O_2$	-0,0053	-0,2304	0,0363	-0,2450	0,0780	-0,2596	0,1196	-0,2742	0,1612	-0,2889
Testa $O_2$	0,1497	<b>-0,0076</b>	0,1497	-0,0156	0,1599	-0,0199	<b>0,1826</b>	-0,0199	<b>0,2052</b>	-0,0199
Abandona	-0,0100	-0,0100	-0,0100	<b>-0,0100</b>	-0,0100	<b>-0,0100</b>	-0,0100	<b>-0,0100</b>	-0,0100	<b>-0,0100</b>
Max VE	0,1612	-0,0076	0,1612	-0,0100	0,1612	-0,0100	0,1826	-0,0100	0,2052	-0,0100

#### 4.4 – Análise de Pesquisas Empíricas Utilizando o Modelo de 2 *Designs* e 2 Testes

Esta Seção analisa algumas pesquisas empíricas sobre estratégias de testes utilizando os resultados do modelo desenvolvido neste capítulo. Os objetivos desta Seção são dois: o primeiro é ter uma validação, mesmo preliminar, e tentativa, do modelo desenvolvido, com resultados de estudos empíricos; e o segundo é tentar aplicar o modelo desenvolvido para obter um entendimento melhor (*insight*) sobre a estratégia de testes, comparando resultados analíticos e empíricos.

É importante salientar que esse processo de análise das pesquisas empíricas, através da lente do modelo desenvolvido, é qualitativa e conceitual. A idéia não é reproduzir, usando o modelo desenvolvido, os resultados numéricos empíricos, mas utilizar a estrutura conceitual e os resultados do modelo para entender as pesquisas empíricas e até identificar as limitações do modelo. Esse mostrou-se ser um caminho viável de análise. Esse processo de análise envolve três etapas: a primeira, é a seleção de pesquisas empíricas. O objetivo é selecionar trabalhos que possam ser analisados pelo modelo desenvolvido. A segunda etapa é estudar cada trabalho selecionado e identificar uma correspondência entre as variáveis e os parâmetros chaves de cada trabalho e o modelo deste capítulo. Esta etapa exige, em primeiro lugar, uma abstração da pesquisa empírica, de acordo com a estrutura conceitual do modelo e, em segundo lugar, requer a inserção de suposições adequadas por causa de lacunas informacionais. A terceira etapa envolve a análise da pesquisa empírica, já enquadrada na estrutura conceitual do modelo, para obter entendimentos e conclusões. Os meios empregados para realizar essa análise são as quatro situações da Figura 4.2. A apresentação desta Seção segue essa seqüência das três etapas de análise.

As pesquisas empíricas selecionadas são todas da Seção 2.3.3 - Pesquisas sobre estratégias de testes em desenvolvimento de produtos. Isto é um resultado esperado, pois os modelos desenvolvidos nesta pesquisa têm como objetivo analisar a estratégia de testes. Por outro lado, nenhuma pesquisa revisada da Seção 2.3.1, que foca no processo decisório, e da Seção 2.3.2, que foca em sistemas de desenvolvimento de produtos, é selecionada. Na avaliação deste autor, os modelos desenvolvidos são indiretamente relacionados às pesquisas empíricas revisadas nessas duas seções.

As três pesquisas selecionadas para a análise são<sup>48</sup>: 1) A pesquisa de Thomke, von Hippel e Frank (1998), sobre os desempenhos de dois processos de descobrimento de novos medicamentos dentro da rota de síntese química: método tradicional de tentativa e erros, e a química combinatória, que permite uma síntese de substâncias muito mais rápida e barata; 2) Os trabalhos de Thomke (1998) e Thomke e Reinstern (1998) que analisam o comportamento, em uso de testes, das equipes de projeto de circuitos integrados utilizando duas tecnologias de *design*, com níveis de flexibilidade muito diferentes: EPLD (*electrically-programmable logic device*) e Asic (*application-specific integrated circuit*).

Os protótipos de EPLD são muito baratos, e o custo de construir e modificar um protótipo de Asic pode ser muito mais alto que o de EPLD; e 3) O estudo do Pisano (1997) que comparou duas rotas tecnológicas distintas, a síntese química e a biotecnologia, para

---

<sup>48</sup> Descrições mais detalhadas desses trabalhos estão na Seção 2.3.3.

desenvolver os medicamentos. Como a indústria farmacêutica, em nível mundial, conhece muito mais sobre a primeira que a segunda rota, Pisano procurou verificar se essa diferença em conhecimento afetaria a estratégia de testes numa amostra de projetos de desenvolvimento de medicamentos.

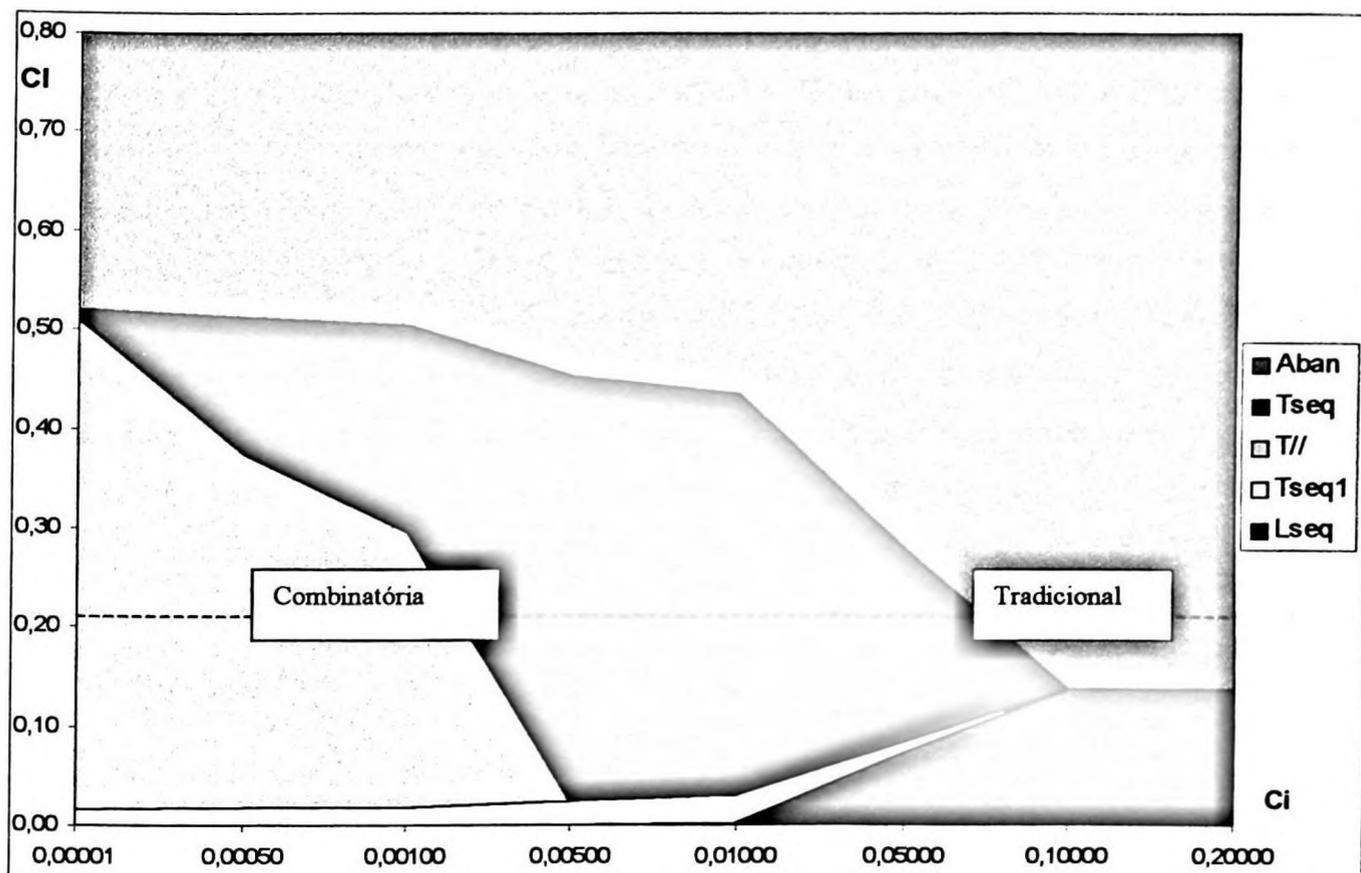
Uma vez selecionados os estudos, as próximas etapas são a identificação de correspondência entre a pesquisa empírica e a estrutura conceitual do modelo desenvolvido neste capítulo, e depois a análise comparativa objetivando a obtenção de *insights*. A pesquisa de Thomke, von Hippel e Frank (1998) é a primeira da lista.

A pesquisa de Thomke, von Hippel e Frank focaliza as diferenças, em desempenho, entre o método tradicional e a moderna técnica de química combinatória de triagem de substâncias. Esses procedimentos são, na realidade, testes para selecionar moléculas para o próximo estágio de desenvolvimento de medicamentos, e são considerados como testes imperfeitos. Os custos de testes ( $C_i$ ), apresentados por Thomke, von Hippel e Frank, são US\$ 19, por substância, para técnica de química combinatória e US\$ 5.000, por substância, para o método tradicional. Em outros termos, o custo de teste do método tradicional é 263 vezes mais caro que o da química combinatória. Thomke, von Hippel e Frank apresentam outras diferenças entre esses dois tipos de testes, tais como o prazo de execução, mas, para simplificar a comparação, essa análise foca somente na diferença dos custos de testes.

Para analisar o impacto em estratégia de testes causado pela tamanha diferença em custos de testes, Thomke, von Hippel e Frank trabalham com dois projetos distintos de desenvolvimento do mesmo medicamento. Um utiliza o método tradicional e outro utiliza a química combinatória para fazer a triagem de moléculas que são as alternativas de *designs*. Os outros parâmetros do problema, tais como probabilidade de sucesso *a priori* ( $s$ ), confiabilidade de teste ( $f$ ), custo de lançamento ( $C_i$ ), etc., dos dois projetos são iguais. Essas suposições não são formalmente colocadas por Thomke, von Hippel e Frank, entretanto, no caso de desenvolvimento de medicamento para glaucoma, citado no trabalho, eles implicitamente empregam essas suposições para comparar um projeto utilizando química combinatória com outro, utilizando método tradicional. Um dos resultados mostra que os especialistas entrevistados acreditam que o custo e o tempo requeridos pelo método tradicional provavelmente inviabilizaria o projeto de desenvolvimento de um medicamento para glaucoma.

Em suma, do ponto de vista da estrutura do modelo de testes, o problema de pesquisa de Thomke, von Hippel e Frank pode ser sintetizado como uma comparação de dois projetos de desenvolvimento que diferem somente no custo de teste imperfeito empregado. Colocadas desta forma, as estratégias de teste desses dois projetos podem ser comparadas usando os resultados do modelo na Figura 4.3. A Figura 4.3 é exatamente a Situação III (Figura 4.2), da Seção 4.3.3, na qual  $s = 0,2$ ;  $f = 0,9$ ; e  $a = 0,3$ . A seleção da Situação III é baseada nos seguintes argumentos: ela apresenta uma baixa probabilidade de sucesso, *a priori* que representa bem o risco de lançamento no setor farmacêutico; e uma alta confiabilidade de teste imperfeito, que representa o alto grau de conhecimento sobre o processo de síntese química (Pisano, 1997). O projeto “Tradicional” tem um  $C_i$  em torno de  $0,1$ , e o projeto “Combinatória” tem um  $C_i$  em torno de  $0,001$ ; uma diferença similar à reportada por Thomke, von Hippel e Frank. Ambos têm custos de lançamento ( $C_l$ ) um pouco acima de  $0,20$ . Nessas condições, o modelo recomenda que o projeto “Tradicional” deve ser abandonado e o projeto “Combinatória” deve adotar a estratégia de testes em paralelo. Esses são comportamentos observados por Thomke, von Hippel e Frank, no seu estudo empírico.

O custo de lançamento ( $C_l$ ) de  $0,20$  é arbitrário; poderia ser maior ou menor que esse valor. Pode-se analisar as conseqüências, em termos de estratégia de teste, de uma variação desse valor de  $C_l$ , mantendo os  $C_i$  constantes. A variação do  $C_l$  pode ser causada pela introdução de normas por agência regulamentadora de um país, por exemplo, a famosa FDA (*Food and Drug Administration*) dos EUA. Um aumento do  $C_l$ , até  $0,5$ , fará o projeto “Combinatória” adotar a estratégia de teste seqüencial (Tseq), mas não modificaria a estratégia de teste do projeto “Tradicional”. Mas, aumentando  $C_l$  além de  $0,5$ , inviabilizaria também o projeto “Combinatória”. Uma redução do  $C_l$  para  $0,1$  ou menos tornaria o projeto “Tradicional” viável com a estratégia de lançamento seqüencial (Lseq), de acordo com os resultados do modelo. Uma prática de lançamento seqüencial, que já é comum no setor, é o lançamento do novo medicamento para um grupo específico de pacientes. Essa análise da variação do  $C_l$  mostra que os resultados da pesquisa de Thomke, von Hippel e Frank (1998) podem ser diferentes se o custo relativo de lançamento for, por exemplo, menor.



**Figura 4.3 – Química Combinatória e Método Tradicional**

A próxima pesquisa empírica analisada é aquela sobre as tecnologias de *design* de circuito integrado (Thomke, 1998; Thomke e Reinstern, 1998). Nessa pesquisa, Thomke e seus colegas analisam o *timing*, a frequência e a intensidade de uso de protótipos completos das equipes de *design* de CI. Mostram empiricamente que, quando o custo de construir o protótipo do CI é muito alto (baixo), a equipe procura investir mais (menos) esforço em simulações em CAD e CAE antes de construir e testar o protótipo completo. No caso em que o custo de implantação de protótipo é baixo (caso do EPLD), a equipe adota a estratégia de “learning by doing”, i.e., construir logo o protótipo completo para aprender com os testes dos *designs*. Para tirar essas conclusões, os pesquisadores procuraram comparar projetos de *design* de CI similares, ajustando, por exemplo, a complexidade tecnológica dos projetos.

Do ponto de vista do modelo desenvolvido neste capítulo, essa pesquisa de Thomke e seus colegas pode ser descrita da seguinte maneira: procura-se analisar as estratégias de testes de dois projetos de desenvolvimento do mesmo tipo de CI. Os dois são idênticos, exceto nos testes perfeitos, i.e., testes com protótipos completos. A equipe do projeto “Asic” dispunha de um teste perfeito mais custoso e a equipe do projeto “EPLD” dispunha de um teste perfeito

bem mais barato:  $C_i(Asic) > C_i(EPLD)$ . As duas equipes utilizam os mesmos tipos de testes imperfeitos: CAD / CAE. Isto é, o custo ( $C_i$ ) e a confiabilidade ( $f$ ) são iguais para os dois projetos. Como os projetos vão desenvolver o mesmo tipo de CI, pode também assumir que as probabilidades, *a priori*,  $\{S\}$ , são idênticas. Este problema de teste pode ser representado em uma das situações da Figura 4.2. A Situação I é selecionada, pois, pelo julgamento deste autor, projetar CI não envolve grandes riscos e as tecnologias de CAD/CAE já são bem maduras, portanto, é apropriado assumir que  $\{S\} = 0,8$  e  $f = 0,9$ . A Figura 4.4 apresenta duas representações alternativas do problema de desenvolvimento de CI Thomke e colegas. A primeira representação conta com os projetos “ASIC 1” e “EPLD 1” com um custo de teste imperfeito ( $C_i$ ) em torno de  $0,05$ . A segunda representação tem os projetos “ASIC 2” e “EPLD 2”, e um custo de CAD/CAE bem menor:  $C_i \cong 0,0005$ . Nota-se que os “ASIC 1” e “ASIC 2” têm o mesmo custo do teste perfeito ( $C_i = 0,40$ ) que é maior que o de “EPLD 1” e “EPLD 2” ( $C_i \cong 0,11$ ).

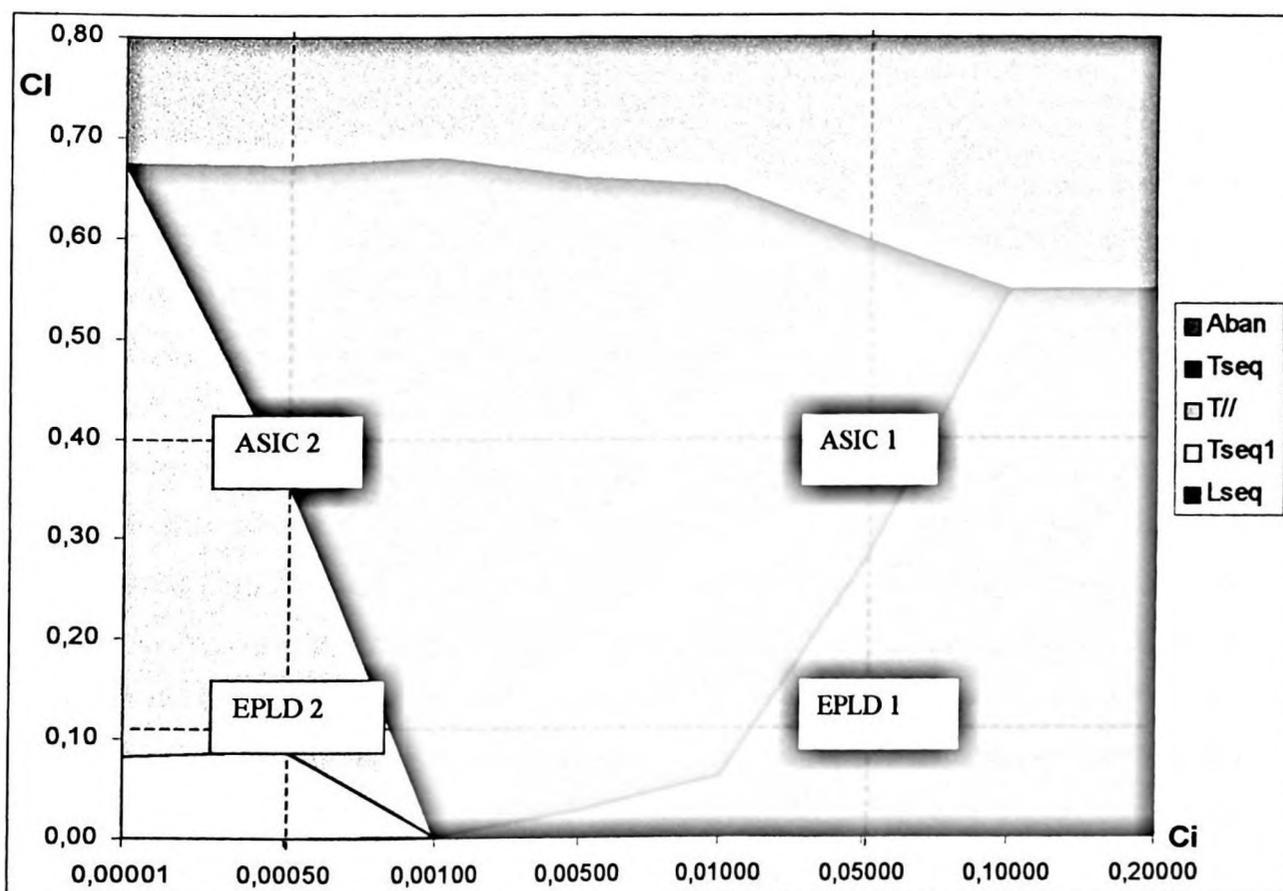


Figura 4.4 – Círculos Integrados: ASIC e EPLD

Analizam-se, a seguir, as estratégias recomendadas, pela Figura 4.4, para cada uma das representações. Na primeira representação, onde  $C_i \cong 0,05$ , a melhor estratégia para ASIC 1 é testar seqüencialmente as alternativas de *design*, usando CAD/CAE, antes de realizar teste com o protótipo completo, e a melhor estratégia para EPLD 1 é testar imediatamente, com protótipo completo (Lseq). Essas recomendações são compatíveis com as observações empíricas do Thomke e colegas: quando o custo de protótipo é alto (ASIC 1), a equipe usa mais CAD/CAE, e quando o custo de protótipo é baixo (EPLD 1), a equipe constrói logo o protótipo completo. Portanto, os projetos “ASIC 1” e “EPLD 1” podem ser considerados como representativos dos projetos estudados por Thomke e seus colegas. Na segunda representação, onde  $C_i \cong 0,0005$ , a melhor estratégia para ASIC 2 continua sendo testar seqüencialmente as alternativas de *design*, antes de se comprometer com protótipos completos. Entretanto, a melhor estratégia para EPLD 2 é agora testar paralelamente várias alternativas de design antes de construir protótipos completos. Essa mudança da estratégia ótima, em relação ao EPLD 1, é causada pela redução drástica do custo de testes imperfeitos (CAD/CAE). Nota-se, na Figura 4.4, que mesmo com uma redução relativamente pequena do  $C_i$ , de 0,05 para 0,01, a estratégia ótima do projeto “EPLD 1” já passaria a ser Tseq.

De acordo com a análise acima, baseada na Situação I, pode-se concluir que a estratégia de utilizar antecipadamente protótipos completos não ocorre sempre com uma redução significativa do custo do teste perfeito. Outro fator importante que pode afetar esse comportamento dos testes é o custo do teste imperfeito, como foi mostrado através da Figura 4.4. Essas conclusões sugerem que as pesquisas empíricas futuras podem estudar as interações entre esses dois custos de testes.

A última pesquisa empírica analisada é a de Pisano (1997). Ele estudou as estratégias de testes de dois grupos de projetos de desenvolvimento de medicamentos. Um grupo utiliza a rota da síntese química e o outro utiliza a da biotecnologia. Como a rota da síntese química é conhecida há mais de 200 anos, pela engenharia química, o nível de conhecimento teórico e prático sobre os processos químicos, as buscas realizadas na escala laboratorial e piloto são relativamente produtivas para descobrir problemas e desenvolver a arquitetura básica do processo. Entretanto, para refinar o processo e adaptá-lo às peculiaridades de uma planta comercial, requer “*learning-by-doing*” no chão da fábrica. Por outro lado, a base de conhecimento sobre os processos bioquímicos é bem diferente dos químicos. Essa diferença se deve principalmente ao estágio de maturidade distinto dessas rotas tecnológicas. Comparada à química, a biotecnologia está na sua infância. Os fatores que afetam o processo biotecnológico, mesmo na escala laboratorial, não são conhecidos. Isto torna a previsão do

desempenho do processo, a partir de uma mudança da escala de produção, difícil. Ainda inexistem heurísticas genéricas que se aplicam para um conjunto maior de processos biotecnológicos, conseqüentemente, a previsão do desempenho do processo a partir de resultados laboratoriais envolve muita incerteza. Os resultados da pesquisa do Pisano mostram que os projetos da rota biotecnológica utilizam menos os testes laboratoriais e mais testes em plantas comerciais. Adicionalmente, esses projetos biotecnológicos iniciam os testes em plantas comerciais mais cedo que os da rota de síntese química. Pisano procurou controlar outras variáveis dos projetos, tais como a complexidade e a escala de produção, para que os projetos sejam comparáveis.

Do ponto de vista do modelo desenvolvido neste capítulo, o problema da pesquisa de Pisano pode ser assim caracterizado: análise das estratégias de testes de dois projetos de desenvolvimento de medicamentos. Os dois projetos são idênticos, exceto nos testes imperfeitos. O projeto “Síntese química” dispõe de um teste imperfeito com alta confiabilidade ( $f = 0,9$ ) que reflete a maior base de conhecimento da rota de síntese química. O projeto “Biotecnológica” dispõe de um teste imperfeito com baixa confiabilidade ( $f = 0,6$ ) que reflete a dificuldade de inferir o desempenho real a partir de ensaios laboratoriais da rota biotecnológica. Como na análise da pesquisa de Thomke, von Hippel e Frank (1998) que também estudaram o setor farmacêutico, adota-se uma probabilidade, *a priori*, de sucesso ( $s$ ) de 0,2. Então a Situação III ( $s = 0,2$  e  $f = 0,9$ ), da Figura 4.2, representa os projetos da rota de síntese química, e a Situação IV ( $s = 0,2$  e  $f = 0,6$ ), representa os da rota biotecnológica (Figura 4.5).

Para analisar as estratégias de testes desses dois projetos, selecionou-se dois cenários para o custo de lançamento (teste perfeito): Custo A  $\cong 0,15$  e Custo B  $\cong 0,08$ . No cenário de Custo B, a estratégia ótima do projeto “Biotecnológica” é a Lseq (lançamento seqüencial) independentemente do valor do  $C_i$ , e a do projeto “Síntese química” é T// ou Tseq para  $0,0001 \leq C_i \leq 0,05$  (Figura 4.5). Esse resultado é compatível com os obtidos por Pisano, pois pode interpretar a estratégia de Lseq como equivalente à de antecipar testes em planta comercial. Para um custo de teste imperfeito acima de 0,05 ( $0,05 \leq C_i$ ), a estratégia ótima dos dois projetos é Lseq. Isto é, mesmo com uma confiabilidade alta, de 90%, a melhor estratégia do projeto “Síntese química” é Lseq, quando o custo de teste imperfeito é suficientemente alto. No cenário Custo A, observa-se que, independentemente do valor do  $C_i$ , o projeto “Biotecnológica” nunca vai adotar a estratégia Lseq. Nota-se que, neste caso, as estratégias dos dois projetos são bastante similares: quando o custo do  $C_i$  for relativamente

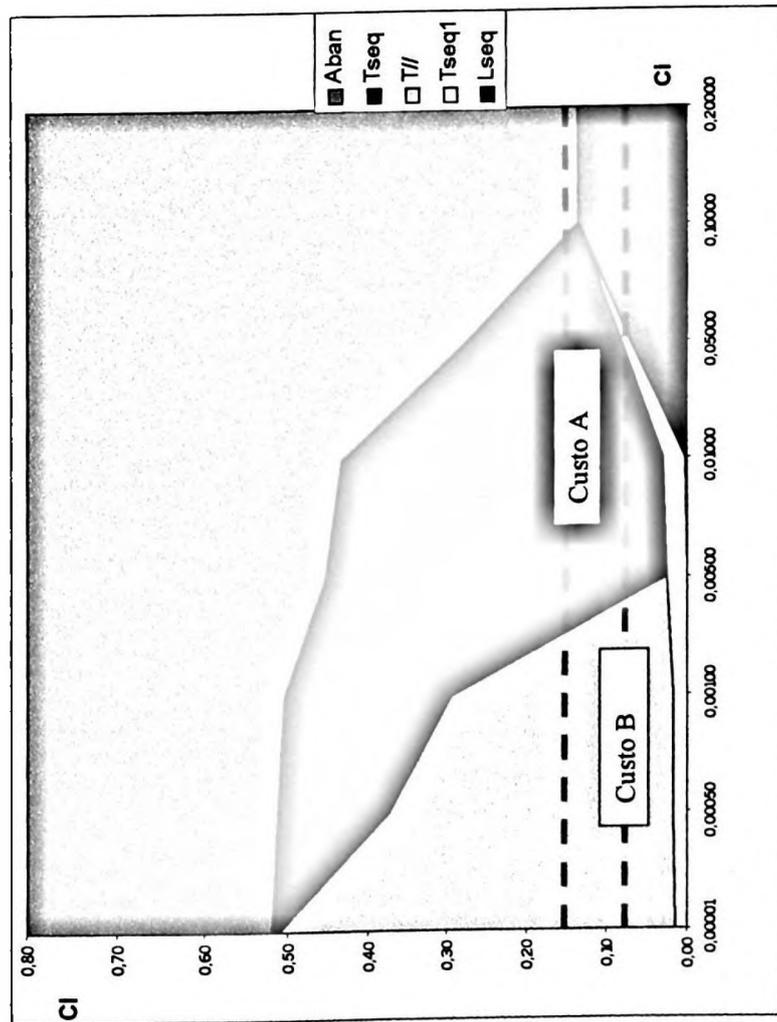
baixo, a melhor estratégia é realizar testes laboratoriais antes de testar em planta comercial; e quando o  $C_i$  for alto demais, os dois projetos tornam-se inviáveis (Aban).

Como nas duas análises anteriores, a estrutura e os resultados do modelo de dois *designs* e dois testes permitem a identificação de condições, definidas por valores assumidos por parâmetros chaves, nas quais se podem observar ou não os resultados da pesquisa empírica do Pisano. Essas três análises mostram, em primeiro lugar, que os resultados do modelo, representadas pelas Situações I a IV da Figura 4.2, podem reproduzir qualitativamente uma pesquisa empírica, desde que a correspondência entre o modelo e a pesquisa seja estabelecida apropriadamente; e, em segundo lugar, que o modelo tem o potencial de ser usado para prever possíveis resultados e sugerir novas pesquisas empíricas. Acredita-se que essa seja uma das contribuições importantes dos modelos analíticos: interagir com as pesquisas empíricas para avançar, em conjunto, a fronteira de conhecimento.

#### 4.5 – Síntese e Conclusões do Capítulo

Este capítulo formula e analisa o modelo de teste com dois *designs* e dois testes, sendo um perfeito e outro imperfeito. Todas as probabilidades condicionais do modelo são expressas em função dos parâmetros fundamentais, tais como a probabilidade, *a priori*, de sucesso do *design*  $i$ ,  $\{S_i\}$ , e a confiabilidade do teste imperfeito  $f$ . Um novo parâmetro fundamental é identificado,  $\{S_i|S_j\}$ , que representa a dependência probabilística entre os dois *designs*. Ele expressa a relação entre os dois *designs* e é denominado de influência entre *designs*. É estabelecida adicionalmente a ordem entre as principais probabilidades condicionais do modelo que são úteis na definição da estratégia ótima de testes. A solução do modelo de teste é obtida através de dois meios: análise matemática e simulação computacional. A análise matemática mostra que os seguintes parâmetros são chaves para determinar a estratégia de teste: custo de lançamento (ou de teste perfeito); o retorno do sucesso do *design*; prazo de lançamento; e as probabilidades de sucesso dados os resultados de testes imperfeitos,  $\{S_i | r_i r_j\}$ . Nota-se que as probabilidades  $\{S_i | r_i r_j\}$  dependem de parâmetros fundamentais, como a influência entre *designs*  $\{S_i|S_j\}$ . As simulações computacionais mostram que a variação da influência entre *designs* afeta não somente o valor esperado das estratégias de testes mas também a determinação da melhor estratégia. Na parte final do capítulo, o modelo de dois *designs* e dois testes é usado para analisar qualitativamente algumas pesquisas empíricas selecionadas. Os resultados mostram que o modelo pode ser utilizado como uma estrutura conceitual para se entender as pesquisas empíricas e indicar potenciais áreas de pesquisas futuras.

a) Síntese química (Situação III)



b) Biotecnologia (Situação IV)

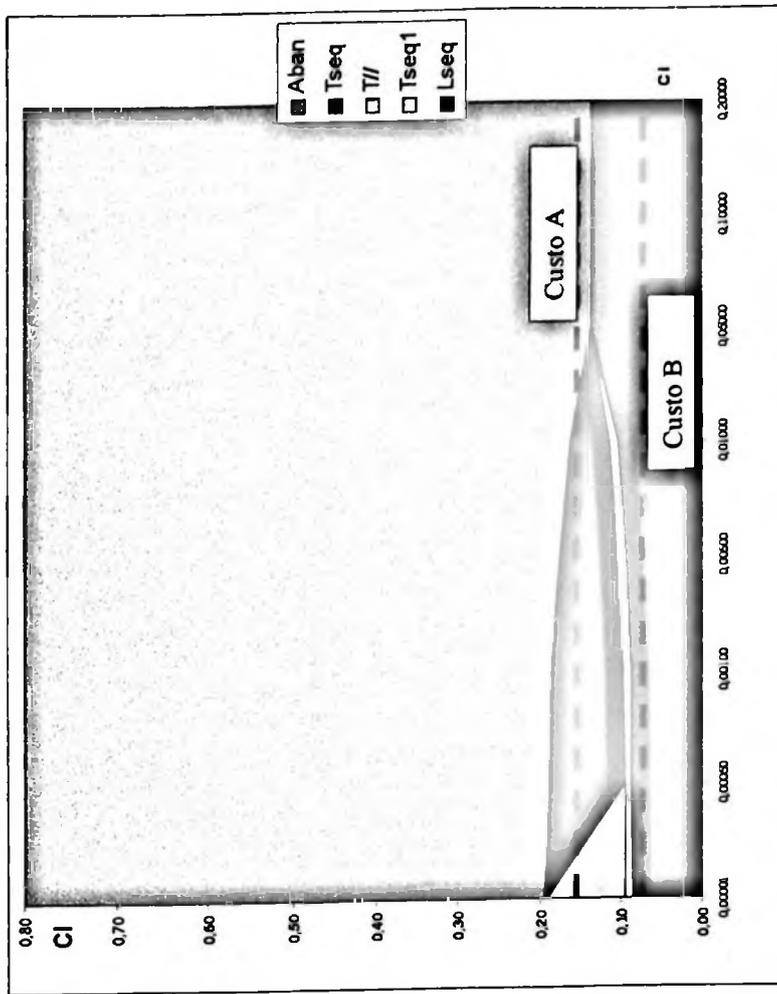


Figura 4.5 – Desenvolvimento de Medicamentos: Síntese Química e Biotecnologia

## **CAPÍTULO 5**

### **SÍNTESES, CONCLUSÕES, CONTRIBUIÇÕES E SUGESTÕES**

## 5.1 – Introdução

Esta pesquisa trata da estratégia do teste no desenvolvimento de produto e do processo produtivo. Os objetivos gerais da pesquisa são: (1) Identificar os parâmetros-chave na determinação da estratégia ótima de teste e entender as inter-relações entre esses parâmetros; e (2) Analisar o comportamento da estratégia ótima em função desses parâmetros. Mais especificamente, a pesquisa procura analisar as dependências probabilísticas, ou influências entre as alternativas de *design* e entre os testes, na determinação da estratégia ótima de teste, e definir rigorosamente esses parâmetros de influência. A abordagem metodológica adotada nesta pesquisa é a modelagem matemática de problemas genéricos de teste a partir de uma revisão da literatura acadêmica sobre a experimentação e teste no desenvolvimento de produtos.

Essa revisão mostra que os modelos matemáticos desenvolvidos para estudar a experimentação e os testes adotam uma série de suposições simplificadoras, e duas das mais recorrentes são: (1) um único tipo de teste é empregado para avaliar ou comparar as alternativas de *design*; e (2) há uma independência probabilística entre os resultados de teste de diferentes *designs*. Entretanto, as pesquisas empíricas (Marple, 1961, e Allen, 1966) constataam que os projetistas utilizam uma gama enorme de experimentações, testes e outros meios para coletar informações e avaliar os *designs*. Outros estudos empíricos, por exemplo, os de Thomke e Reinstern (1998), mostram que o avanço tecnológico em teste e experimentação criou mais opções para a estratégia de testes. Em relação à dependência probabilística entre os *designs*, somente mais recentemente é que os estudos analíticos começam a se preocupar com esse aspecto da estratégia de teste (Loch, Terwiesch e Thomke, 2001).

A presente pesquisa contribui para a literatura de pesquisa analítica focando nas lacunas acima identificadas: incorporar dependências probabilísticas, denominadas de influências entre resultados de testes, na determinação de estratégia ótima dos testes; e incorporar mais de um tipo de testes no processo de desenvolvimento e analisar o seu impacto na estratégia de teste. A inclusão de vários tipos de testes permite a avaliação de uma diversidade maior de estratégia de testes e facilita a análise dos impactos da introdução de novas tecnologias.

## 5.2 – Resultados, Contribuições e Limitações

Os resultados desta pesquisa podem ser classificados em dois grupos distintos: o primeiro grupo é composto de modelos matemáticos elaborados para representar o problema genérico do teste numa tarefa de desenvolvimento. O segundo grupo é constituído de conclusões e entendimentos, ou *insights*, de acordo com Ulrich (2001), a partir da análise e simulação dos modelos. Uma síntese desses resultados é apresentada a seguir.

Duas classes de modelos são desenvolvidas: modelos com uma única alternativa de *design* e um modelo com dois *designs* e dois tipos de testes. São desenvolvidos três modelos para a primeira classe: o mais simples conta com um único teste perfeito; o segundo conta com dois testes, sendo um perfeito; e o terceiro conta com três testes, sendo dois imperfeitos. As duas formulações iniciais introduzem a terminologia, a estrutura matemática básica dos modelos e o critério de determinação da estratégia ótima de teste. A análise do modelo com três testes permite identificar um novo tipo de probabilidade, denominada de confiabilidade condicionada  $\{r_i | r_j r_3\}$ . A confiabilidade condicionada é uma medida da influência do resultado de um teste sobre o de outro, para o mesmo *design*. Essa influência pode ser positiva ou negativa, dependendo da relação entre os dois testes. Ela permite a atualização do conhecimento sobre os possíveis resultados de um teste, a partir do resultado observado em outro teste. Esta pesquisa demonstra que, se dois testes são relacionados, então, somente duas confiabilidades condicionadas precisam ser especificadas, além de outros parâmetros fundamentais (probabilidade, *a priori* de sucesso; as duas confiabilidades; os custos e o retorno) para viabilizar a solução do problema de testes. É também mostrada que a relação entre o valor esperado de uma estratégia de teste e a confiabilidade condicionada é linear e, dependendo dos valores dos parâmetros do problema, um aumento da confiabilidade condicionada pode resultar em um crescimento, uma diminuição, ou até na manutenção do valor esperado da estratégia de teste.

A segunda classe consiste de um modelo de teste com dois *designs* e dois testes, sendo um perfeito e outro imperfeito. Todas as probabilidades condicionais do modelo são expressas em função dos parâmetros fundamentais, tais como a probabilidade *a priori* de sucesso do *design*  $i$ ,  $\{S_i\}$ , e a confiabilidade do teste imperfeito  $f$ . Um novo parâmetro fundamental,  $\{S_i|S_j\}$ , é identificado e ele representa a dependência probabilística entre os dois *designs*; expressa a relação probabilística entre os dois projetos e é denominado de influência entre *designs*. Esta pesquisa demonstra que a influência entre os *designs* determina a ordem entre as principais probabilidades condicionais do modelo, que é a chave na definição da estratégia ótima de testes. A solução do modelo de teste é obtida através de dois meios: a análise

matemática e a simulação computacional. A análise matemática mostra que os seguintes parâmetros são críticos para determinar a estratégia de teste: o custo de lançamento (ou de teste perfeito); o retorno do sucesso do *design*; o prazo de lançamento; e as probabilidades condicionais de sucesso, dados os resultados de testes imperfeitos,  $\{S_i|r_j\}$ , sendo que essas probabilidades dependem de parâmetros fundamentais, como a influência entre *designs*  $\{S_i|S_j\}$ . As simulações computacionais mostram que a variação da influência entre *designs* afeta não somente o valor esperado das estratégias de testes mas também a determinação da melhor estratégia. Mais especificamente, as principais conclusões são: (1) A estratégia de lançamento seqüencial (realizar testes reais na seqüência) é ótima quando o custo do teste real é relativamente baixo, e quando o teste imperfeito tem um custo alto e baixa confiabilidade. Esta é uma situação típica quando há pouco conhecimento sobre a tecnologia do produto ou quando inexistente infra-estrutura laboratorial; (2) Uma maior influência positiva entre as alternativas de *design* não favorece o uso de testes imperfeitos (teste laboratorial, simulação digital, etc.); e (3) A relação do custo do teste real sobre o retorno obtido com o sucesso da tarefa é um parâmetro-chave que determina a estratégia ótima de teste. O baixo custo do teste real incentiva o lançamento direto do produto, ou componente. Um custo intermediário de teste real promove a aplicação de testes imperfeitos, e um alto custo de teste real força o abandono do projeto. Um resultado interessante desta pesquisa é uma demonstração da viabilidade de analisar, qualitativamente, pesquisas empíricas selecionadas, utilizando os resultados do modelo de dois *designs* e dois testes. Em outros termos, o modelo pode ser utilizado como uma estrutura conceitual que permite entender as pesquisas empíricas e sugerir potenciais áreas de pesquisas futuras.

As principais contribuições desta pesquisa para os estudos sobre estratégia de teste em desenvolvimento de produtos são:

- Incorporação da seleção do tipo de teste a ser realizado em modelos de teste no desenvolvimento de produtos – os modelos matemáticos de teste da literatura são baseados, principalmente, na teoria de busca (*search*), que trabalha com um único tipo de teste.
- Identificação e especificação de parâmetro de confiabilidade condicionada,  $\{r_i|r_jS_j\}$  – esse tipo de probabilidade condicional define as relações de influência entre os testes para o mesmo *design*. Esse tipo de parâmetro não é relatado na literatura revisada. Entretanto, com os constantes avanços nas tecnologias de testes, as inter-relações probabilísticas entre os mesmos devem receber uma atenção maior.

- Identificação e especificação do parâmetro da influência entre os designs,  $\{S_i|S_j\}$  – esta probabilidade condicional define completamente a influência entre o *design i* e o *design j*, em que  $S_i$  é o sucesso do design *i* e  $S_j$  é o sucesso do *j*. A literatura existente trata de uma situação bem particular: assume  $\{S_i|S_j\} = 0$ , isto é, dado que o design *j* é um sucesso, a probabilidade de sucesso do *i* é zero.
- Desenvolvimento das relações da influência entre os designs,  $\{S_i|S_j\}$ , e outras probabilidades condicionadas importantes para a determinação da estratégia ótima de teste. É demonstrado o papel crítico da influência entre designs na definição da ordem entre as probabilidades  $\{S_i|r_i r_j\}$ .
- Identificação de parâmetros-chave na determinação da estratégia ótima de teste do modelo de dois designs e dois testes – além da  $\{S_i|S_j\}$ , outro parâmetro importante identificado é a relação custo de teste real ( $C_i$ ) dividido pelo retorno ( $R$ ), mais precisamente  $(C_i / R\alpha^{tl})$ . Essa relação, em conjunto com o custo do teste imperfeito ( $C_i$ ) determina, muitas vezes, a estratégia ótima de teste.
- Demonstrações da aplicabilidade do modelo de dois designs e dois testes, através de duas abordagens; na primeira, utilizando simulação computacional para determinar a estratégia ótima de teste para uma série de situações típicas de problema de testes (as Situações I a IV da Figura 4.2); na segunda, utilizando esses resultados computacionais para analisar, conceitualmente, algumas pesquisas empíricas sobre estratégia de testes.

Em relação às limitações desta pesquisa, as principais são: (1) Os designs são dados do problema, isto é, nos modelos desenvolvidos, a tarefa do projetista é escolher os designs disponíveis. Estudos empíricos mostram que as alternativas emergem ao longo do projeto de desenvolvimento (Allen, 1966); (2) Esta formulação também restringe a aplicabilidade dos modelos para analisar outras situações de testes, por exemplo, quando o objetivo dos testes é a identificação de problemas ou erros de design (von Hippel e Tyre, 1995; Thomke e Bell, 2001); e (3) A dificuldade de obter parâmetros numéricos para calibrar os modelos a partir das pesquisas empíricas. Devido às suposições simplificadoras, a correspondência entre o modelo e as pesquisas empíricas só pode ser estabelecida qualitativamente. A partir dessa reflexão sobre as limitações desta pesquisa, a próxima seção delinea as sugestões para as pesquisas futuras em estratégia de testes.

### 5.3 – Sugestões para Pesquisas Futuras

As sugestões para as pesquisas futuras são de duas categorias. Na primeira categoria, estão sugestões que não requerem modificações estruturais dos modelos desenvolvidos nesta pesquisa. Se se quiser usar a linguagem de desenvolvimento de produtos, seriam modelos derivativos da “plataforma” já desenvolvida. A segunda categoria envolve sugestões que exigem modificações estruturais dos modelos para permitir a análise de outras situações de problemas de testes. Essas seriam, então, sugestões para desenvolver novas “plataformas” ou novos modelos.

As sugestões da primeira categoria, derivativas dos modelos desenvolvidos nesta pesquisa, são:

- Pesquisa sobre as influências entre três *designs*: analisar as probabilidades condicionais do tipo  $\{S_2|S_1S_3\}$ . Um dos desafios é desenvolver um procedimento prático de estimação dessas probabilidades. Outro desafio é analisar o impacto na estratégia de teste com diferentes níveis de influência entre os três *designs*. O modelo mínimo requerido para esta pesquisa deve ter três *designs* e dois testes. Um passo seguinte, nessa linha de pesquisa, seria analisar um problema de teste com  $n$  *designs*.
- Pesquisa sobre a ocorrência simultânea de confiabilidade condicionada e influência entre *designs*. Os modelos desenvolvidos na presente pesquisa procuram separar a confiabilidade condicionada das influências entre os *designs*. Entretanto, um modelo com dois *designs* e três teste, sendo dois imperfeitos, já apresenta probabilidade condicional envolvendo influências entre os *designs* e os testes. Definir rigorosamente essas probabilidades e desenvolver maneiras de minimizar os esforços de estimação seriam desafios para pesquisas futuras.
- Desenvolver modelos de testes mais genéricos envolvendo  $n$  *designs* e  $m$  tipos de testes. Esta pesquisa depende dos resultados das anteriores, portanto, deve ser realizada depois que as duas estejam concluídas.
- Pesquisas empíricas podem ser realizadas para confirmar ou explorar os resultados deste estudo. Duas sugestões são colocadas a seguir. A primeira envolve um estudo para identificar e estimar as dependências probabilísticas entre os *designs* e entre os testes. No caso de confiabilidades condicionadas, podem-se estudar as influências entre os testes típicos utilizados em certos segmentos industriais. No caso de influências entre *designs*, podem-se estudar as dependências entre as opções de *designs* dentro de projetos em andamento. Uma segunda sugestão é estudar as práticas dos projetistas em lidar com as

dependências probabilísticas entre os *designs* e entre os testes, e comparar essas práticas com as soluções normativas apresentadas nesta pesquisa.

As sugestões da segunda categoria, isto é, de novas plataformas do futuro, são:

- Como lidar com a geração de alternativas durante o projeto? Todos os modelos, inclusive os da presente pesquisa, assumem que as alternativas são dadas no início do projeto. Entretanto, a pesquisa do Allen (1966) mostra que uma parte das alternativas de *design* surge depois do início do projeto e os estudos sobre a resolução de problemas (Baron, 1994) sugerem que uma das vantagens do método de tentativas e erro é a geração de alternativas durante o processo. A questão de pesquisa é, então, como incorporar a geração de alternativas durante o processo de desenvolvimento de produtos nos modelos matemáticos. Outra forma de colocar essa questão de pesquisa é: como analisar formalmente o método de tentativas e erros?
- Como integrar, num modelo de estratégia de teste, a seleção de *designs* e a identificação e a correção de problemas? Os modelos desenvolvidos nesta pesquisa definem a estratégia de testes como a seleção do melhor *design* entre uma ou duas alternativas. Modelos similares, na literatura, são os de Weitzman (1979) e Loch, Terwiesch e Thomke (2001). Por outro lado, existem modelos sobre a estratégia de testes que tratam da detecção e da correção de problemas durante o projeto (Thomke e Bell, 2001). Sabe-se que o desenvolvimento de produtos envolve tanto a seleção do melhor *design* como a detecção e a correção de problemas (Clark e Wheelwright, 1993, p. 603). A questão da pesquisa proposta é a integração dessas duas atividades de testes num único modelo, de modo a permitir a análise das interações entre elas.

## **BIBLIOGRAFIA**

- ABERNATHY, W.J.; ROSENBLOOM, R.S. Parallel and sequential R & D strategies: application of a simple model. IEEE Transactions on Engineering Management, New York, v.15, n.1, p.2-10, Mar. 1968.
- ADLER, P.S. Shared learning. Management Science, Baltimore, v.36, n.8, p.938-957, Aug. 1990.
- ADLER, P.S.; CLARK, K.B. Behind the learning curve: a sketch of the learning process. Management Science, Baltimore, v.37, n.3, p.267-281, Mar. 1991.
- ALLEN, T. Studies of the problem-solving process in engineering design. IEEE Transactions on Engineering Management, New York, v.EM-13, n.2, p.72-83, June 1966.
- ARROW, K.J. The economic implications of learning by doing. Review of Economic Studies, Oxford, v.29, n.3, p.155-173, June 1962.
- BALDWIN, C.Y.; CLARK, K.B. Design Rules – The power of modularity. Cambridge: MIT Press, 2000. 471p., V.1;
- BALDWIN, C.Y.; CLARK, K.B. Managing in an age of modularity. Harvard Business Review, Boston, v.75, n.5, p.84-93, Sept./Oct. 1997.
- BARON, J. Thinking and deciding. 2 ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. 588p.
- BATAGLIA, W.; YU, A.S.O. O Processo decisório de investimento estratégico em tecnologia de informação: um estudo na agroindústria do Estado de São Paulo. Trabalho apresentado no XXVI ANPAD, realizado em Salvador, Bahia, no período de 22 a 25 de setembro, 2002.
- BHATTACHARYA, S.; KRISHNAN, V.; MAHAJAN, V. Managing new product definition in highly dynamic environments. Management Science, Baltimore, v.44, n.11, pt2; p.550-564, Nov. 1998.
- BOEHM, B.W.; GRAY, T.E.; SEEWALDT, T. Prototyping versus specifying: a multiproject experiment. IEEE Transactions on Software Engineering, New York, v.SE-10, n.3, p.290-303, May 1984.
- BOHN, R.E. Noise and learning in semiconductor manufacturing. Management Science, Baltimore, v.41, n.1, p.31-42, Jan. 1995.
- BOWEN, H.K. et al. The perpetual enterprise machine: seven keys to corporate renewal through successful product and process development. New York: Oxford University Press, 1994. 436p.
- BROWN, S.L.; EISENHARDT, K.M. Product development: past research, present findings, and future directions. Academic Management Review, v. 20, p. 343-378, April 1995.
- BRUCE, M.; BIEMANS, W.G. (Ed.) Product development: meeting the challenge of the design-marketing interface. Chichester: John Wiley & Sons, 1995. 345p.

- CALANTONE, R.J.; DI BENEDETTO, C.A. (Comp.) Successful industrial product innovation: an integrative literature review. New York: Greenwood Press, 1990. 174p.
- CARRASCOSA, M.; EPPINGER, S.D.; WHITNEY, D.E. Using the design structure matrix to estimate product development time. In: ASME DESIGN AUTOMATION CONFERENCE, Atlanta, GA., Sept. 1998. (DETC98-6013)
- CHRISTENSEN, C.; SUÁREZ, F.F.; UTTERBACK, J.M. Strategies for survival in fast-changing industries. Management Science, Baltimore, v.44, n.12, pt2, p.207-220, Dec. 1998.
- CHUN, Y.H. Sequential decisions under uncertainty in the R&D project selection problem. IEEE Transactions on Engineering Management, New York, v.41, n.4, p.404-413, Nov. 1994.
- CLARK, K.B. The interaction of design hierarchies and market concepts in technological evolution. Research Policy, Amsterdam, v.14, p.235-251, 1985.
- CLARK, K.B.; FUJIMOTO, T. The Power of Product Integrity. Harvard Business Review, Boston, v.68, n.6, p.107-119, Nov./Dec. 1990.
- CLARK, K.B.; WHEELWRIGTH, S.C. Managing new product and process development: text and cases. New York: The Free Press, 1993. 896p.
- CLEMEN, R.T.; REILLY, T. Making hard decisions with decision tools. Pacific Grove, CA: Duxbury, 2001. 733p.
- COOPER, R.G. Product leadership: creating and launching superior new products. Cambridge: Preseus Books, 2000. 314 p.
- DAHAN, E.; MENDELSON, H. An extreme-value model of concept testing. Management Science, Baltimore, v.47, n.1, p.102-116, Jan. 2001.
- DOUGHERTY, D. A practice-centered model of organizational renewal through product innovation. Strategic Management Journal, Chichester, v.13, p.77-92, 1992.
- EISENHARDT, K.M.; TABRIZI, B.N. Accelerating adaptive processes: product innovation in the global computer industry. Administrative Science Quarterly, Ithaca, v.40, p.84-110, Mar. 1995.
- EVENSON, R.E.; KISLEV, Y. A stochastic model of applied research. Journal of Political Economy, Chicago, v.84, n.2, p.265-281, Apr. 1976.
- FRISCHMUTH, D.S.; ALLEN, T.J. A model for the description and evaluation of technical problem solving. IEEE Transactions on Engineering Management, New York, v.EM-16, n.2, p.58-64, May 1969.
- GARVIN, D.A. Learning in action: a guide to putting the learning organization to work. Boston: Harvard Business School Press, 2000. 256p.
- GERWIN, D.; BARROWMAN, N.J. An evaluation of research on integrated product development. Management Science, Baltimore, v.48, n.7, p.938-953, July 2002.

GEUS, A.P. Planning as leaning. Harvard Business Review, Boston, v.66, n.2, p.70-74, March/April, 1988.

HABERMEIER, K.F. Product use and product improvement. Research Policy, New York, v.19, n.3, p.271-283, 1990.

HAX, A.C.; WILDE II, D.L. The delta model: adaptive management for a changing world. Sloan Management Review, Cambridge, v.40, n.2, p.11-28, 1999.

HOWARD, R.A. The foundation of decision analysis. In: HOWARD, R.A.; MATHESON, J.E. (Ed.) Readings the principles and applications of decision analysis. Menlo Park: Strategic Decision Group, 1984. p.581-589, v.2. (Professional collection)

HUCHZERMEIER, A.; LOCH, C.H. Project management under risk: using the real options approach to evaluate flexibility in R&D. Management Science, Baltimore, v.47, n.1, p.85-101, Jan. 2001.

ANSITI, M. How the incumbent can win: managing technological transitions in the semiconductor industry. Management Science, Baltimore, v.46, n.2, p.169-185, Feb. 2000.

ANSITI, M. Technology integration: making critical choices in a dynamic world. Boston: Harvard Business School Press, 1998. 248p.

KHANNA, T.; ANSITI, M. Firm asymmetries and sequential R&D: theory and evidence from the mainframe computer industry. Management Science, Baltimore, v.43, n.4, p.405-421, Apr. 1997.

KRISHNAN, V.; EPPINGER, S.D.; WHITNEY, D.E. A model-based framework to overlap product development activities. Management Science, Baltimore, v.43, n.4, p.437-451, Apr. 1997.

KRISHNAN, V.; ULRICH, K.T. Product development decisions: a review of the literature. Management Science, Baltimore, v.47, n.1, p.1-21, Jan. 2001.

LEONARD-BARTON, D. Wellsprings of knowledge :building and sustaining the sources of innovation. Boston : Harvard Business School Press, 1995. 334 p.

LEVINTHAL, D.A. Adaption on rugged landscape. Management Science, Baltimore, v.43, n.7, p.934-950, July, 1997.

LEVINTHAL, D.A.; MARCH, J.G. The myopia of learning. Strategic Management Journal, New York, v.14, p.95-112, 1993.

LINDBLOM, C.E. The science of "muddling through". Public Administration Review, Washington, v.19, n.2, p.79-88, Mar./Apr. 1959.

LIPPMAN, S.A.; MCCARDLE, K.F. Uncertain search: a model of search among technologies of uncertain values. Management Science, Baltimore, v.37, n.11, p.1474-1490, Nov. 1991.

- LOCH, C.H.; TERWIESCH, C.; THOMKE, S. Parallel and sequential testing of design alternatives. Management Science, Baltimore, v.45, n.5, p.663-678, May 2001.
- LYNN, G.S. et al. Learning is the critical success factor in developing truly new products. Research Technology Management, New York, v.41, n.3, p.45-51, May-June, 1998.
- LYNN, G.S.; MORONE, J.G.; PAULSON, A.S. Marketing and discontinuous innovation: the probe and learn process. California Management Review, Berkeley, v.38, n.3, p.8-37, Spring 1996.
- MAHAJAN, V.; WIND, J. New product models – practice, shortcomings and desired improvements. J. Product Innovation Management, v. 9. p. 128-139, June 1992.
- MARCH, J.G.; SPROULL, L.S.; TAMUZ, M. Learning from samples of one or fewer. Organization Science, Irvine, v.2, n.1, p.1-13, 1991.
- MARIOTTO, F.L. Mobilizing emergent strategies. São Paulo: FGV-EASP, 2000. (Relatório 10/2000)
- MARPLES, D.L. The decisions of engineering design. IRE Transactions on Engineering Management, New York, v.8, n.2, p.55-71, June 1961.
- MASCITELLI, R. From experience: Harnessing tacit knowledge to achieve breakthrough innovation. Journal Product Innovation Management, New York, v.7, n.2, p. 179-193, Mar. 2000.
- MAZZOLA, J.B.; MCCARDLE, K.F. A Bayesian approach to managing learning-curve uncertainty. Management Science, Baltimore, v.42, n.5, p.680-692, May 1996.
- MCGRATH, R.G. Falling forward: real options reasoning and entrepreneurial failure. Academy of Management Review, Mississippi, v.24, n.1, p.13-30, Jan./Mar. 1999.
- MCGRATH, R.G.; MACMILLAN, I.C.; TUSHMAN, M.L. The role of executive team actions in shaping dominant designs: towards the strategic shaping of technological progress. Strategic Management Journal, Chichester, v.13, p.137-161, 1992.
- MINTZBERG, H. RAISINGHANI, D.; THÉORËT, A. The structure of unstructured decision processes. Administrative Science Quarterly, Ithaca, v.21, n.2, p.246-275, June 1976.
- MODY, A. Firm strategies for costly engineering learning. Management Science, Baltimore, v.35, n.4, p.496-512, Apr. 1989.
- MONTOYA-WEISS, M.M.; O'DRISCOLL, T.M. From experience: applying performance support technology in the fuzzy front end. Journal Product Innovation Management, New York, v.7, n.2, p. 143-161, Mar. 2000.
- MOORMAN, C.; MINER, A.S. Organizational improvisation and organizational memory. Academy of Management Review, New York, v.23, n.4, p.698-723, 1998.
- MOORMAN, C.; MINER, A.S. The convergence of planning and execution: improvisation in new product development. Journal of Marketing, New York, v.62, p.1-20, July 1998.

- MULLANEY, T. et al. E-Biz surprise: special report. Business Week, New York, n.3832, p.60-68, 12 May 2003.
- NELSON, R.R. The role of knowledge in R&D efficiency. The Quarterly Journal of Economics, Cambridge, v.97, n.3, p.453-470, Aug. 1982.
- NELSON, R.R. Uncertainty, learning, and the economics of parallel research and development efforts. The Review of Economics and Statistics, Amsterdam, v.43, n.4, p.351-364, Nov. 1961.
- PASCALE, R.T. The Honda effect. California Management Review, Berkeley, v.38, n.4, p.80-91, Summer 1996.
- PISANO, G.P. Learning-before-doing in the development of new process technology. Research Policy, Amsterdam, v.25, p. 1097-1119, 1996.
- PISANO, G.P. The development factory: unlocking the potential of process innovation. Boston: Harvard Business School Press, 1997. 343p.
- PORTER, M.E. Vantagem competitiva: criando e sustentando em desempenho superior. Campus, 1985.
- REINERTSEN, D.G. Managing the design factory. Free Press; 1997. 269p.
- SANCHEZ, R.; MAHONEY, J.T. Modularity, flexibility, and knowledge management in product and organization design. Strategic Management Journal, Chichester, v.17, p. 63-76, Winter 1996.
- SHARED problem solving. In: LEONARD-BARTON, D. Wellsprings of knowledge: building and sustaining the sources of innovation. Boston: Harvard Business Review, 1995. Cap. 3, p.59-89.
- SIMON, H.A. The science of the artificial. 2.ed. Cambridge: MIT Press, 1981. 247p.
- SIMON, H.A. The structure of ill structured problems. Artificial Intelligence, v.4, n.3/4, p.181-201, Winter 1973.
- SMITH, R.P.; EPPINGER, S.D. A predictive model of sequential iteration in engineering design. Management Science, Baltimore, v.43, n.8, p.1104-1120, Aug. 1997.
- SOBEK II, D.K.; WARD, A.C.; LIKAR, J.K. Toyota's principles of set-based concurrent engineering. Sloan Management Review, Cambridge, v. 40, p. 67-83, Winter 1999.
- SOBEK II, D.K. Principles that shape product development systems: a Toyota-Chrysler comparison. 1997. 279f. Thesis (Doctor of Philosophy) – Industrial and Operations Engineering, University of Michigan, 1997.
- SRINIVASAN, V.; LOVEJOY, W.S.; BEACH, D. Integrated product design for marketability and manufacturing. Journal of Marketing Research, Chicago, v.34, p.154-163, Feb. 1997.

- SURVEY: The solid future of rapid prototyping. The Economist, London, v.358, n.8214, Mar. 24, 2001.
- THOMAS, R.J. New product success stories: lessons from leading innovators. New York: John Wiley & Sons, 1995. 342p.
- THOMKE, S.; BELL, D.E. Sequential testing in product development. Management Science, Baltimore, v.47, n.2, p.308-323, Feb. 2001.
- THOMKE, S.H. Enlightened experimentation the new imperative for innovation. Harvard Business Review, New York, v.79, n.2, p.66-75, Feb. 2001.
- THOMKE, S.H. Managing experimentation in the design of new products. Management Science, Baltimore, v.44, n.6, p. 743-762, June, 1998.
- THOMKE, S.H. The role of flexibility in the development of new products: na empirical study. Research Policy, Amsterdam, v.26, n.1, p.105-119, Mar.1997.
- THOMKE, S.H.; FUJIMOTO, T. The effect of "Front-Loading" problem –solving on product development performance. Journal Product Innovation Management, New York, v.17, n.2, p.128-142, Mar. 2000.
- THOMKE, S.H.; HOLZNER, M.; GHOLAMI, T. The crash in the machine. Scientific American, New York, v. 280, n.3, p.72-77, Mar. 1999.
- THOMKE, S.H.; REINERTSEN, D. Agile product development: managing development flexibility in uncertain environments. California Management Review, Berkeley, v.41, n.1, p.8-30, Fall 1998.
- THOMKE, S.H.; VON HIPPEL, E.; FRANKE, R. Modes of experimentation: an innovation process – and competitive – variable. Research Policy, Amsterdam, v.27, n.3, p.315-332, July 1997.
- ULRICH, K.T. Introduction to the special issue on desgn and development. Management Science, Baltimore, v.47, n.1, p.v-vi, Jan. 2001.
- ULRICH, K. The role of product architecture in the manufacturing firm. Research Policy, Amsterdam, v.,4, n.3, p.419-440, May 1995.
- ULRICH, K.T.; EPPINGER, S.D. Product design and development. New York McGraw-Hill, 1995. 288p.
- UPTON, D.M.; KIM, B. Alternative methods of learning and process improvement in manufacturing. Journal of Operations Management, v.16, n.1, p.1-20, Jan. 1998.
- URBAN, G.L.; HAUSER, J.R.; DHOLAKIA, N. Essentials of new product management. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1987. 340p.
- VON HIPPEL, E. Economics of product development by users: the impact of "sticky" local information. Management Science, Baltimore, v.44, n.5, p.629-644, May 1998.

- VON HIPPEL, E.; TYRE, M.J. How learning by doing is done: problem identification in novel process equipment. Research Policy, New York, v.24, n.1, p.1-12, Jan. 1995.
- WARD, A. et al. The Second Toyota paradox: how delaying decisions can make better cars faster. Sloan Management Review, Cambridge, v.37, p.43-61, Spring, 1995.
- WEITZMAN, M.L. Optimal search for the best alternative. Econometrica, Menasha, v.47, n.3, p.641-654, May 1979.
- WIELAND, V. Learning by doing and the value of optimal experimentation. Journal of Economic Dynamics & Control, Amsterdam, v.24, p.501-534, 2000.
- WILSON, C.C.; KENNEDY, M.E.; TRAMMELL, C.J. Superior product development: managing the process for innovative products. Cambridge: Blackwell Business, 1996. 254p.
- WINTER, S.G. Optimization and evolution in the theory of the firm. In: DAY, R.H.; GORVES, T. Adaptive economic models. New York: Academic Press, 1975. p.73-118.

