SERVIÇO DE PÓS-GRADUAÇÃO DO ICMC-USP

Data de Depósito: 25/02/2002

Assinatura: Rodrigo Funabashi Jorge

Teste de Mutação: subsídios para a redução do custo de aplicação

Rodrigo Funabashi Jorge

Orientador: Prof. Dr. Márcio Eduardo Delamaro

EXISTE UMA VERSÃO REVISADA

Dissertação apresentada ao Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação - ICMC-USP, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências de Computação e Matemática Computacional.

USP - São Carlos
Fevereiro/2002

A Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Márcio Eduardo Delamaro

Prof. Dr. Paulo Cesar Masiero

Profa. Dra. Sandra Camargo Pinto Ferraz Fabbri

*Ao meu filho Pedro Paulo,
aos meus pais, Elcio e Sônia,
e a minha irmã Patrícia*

Agradecimentos

Agradeço inicialmente a DEUS, pelo dom da vida e por me acompanhar em todos os momentos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Márcio Eduardo Delamaro, pela orientação e profissionalismo durante todo o período deste trabalho.

Ao Prof. Dr. José Carlos Maldonado pelo apoio e ajuda atribuída no desenvolvimento desse trabalho e pela revisão da dissertação.

Em especial ao Auri, pela grande amizade e por estar sempre disposto a ajudar, mesmo em momentos difíceis.

Aos meus pais, Elcio e Sônia, e minha irmã Patrícia, pelo amor, incentivo e constante apoio em todos os momentos da minha vida.

Ao meu filho Pedro Paulo, por “entender” a minha ausência para que esse trabalho pudesse ser desenvolvido, e a Fábria por sempre se esforçar para que eu pudesse estar com nosso filho, as vezes deixando seus compromissos de lado.

Aos demais Professores do grupo de Engenharia de Software e ao Prof. Dr. Dorival Leão Pinto Júnior pela contribuição no desenvolvimento desse trabalho.

Aos meus amigos: Adenilso (Ades), Andrea (Colaboradora), Ana (Banana), Aline, Camilo, Elisa, Ellen (Cachorrone), Emerson, Érica, Fernando (Tranquilo), Gelza, Erald (Holandês), Luciana (DTI), Luciano, Marcelo, Maria Istela, Mayb, Matheus, Rejane, Richard, Rogério, Rosana, Silvio, Simone, Thaise, Tatiana (Ninja), Vangrei e Viviane (Vivi) .

Aos companheiros de República: André (Maluquinho), Gustavo (Amebão), Kleber, Reginaldo (Ré) e Ricardo (Mininim)[†], pelos bons momentos que passamos juntos e que sempre estarão guardados em meu coração.

Aos funcionários do ICMC, pela disposição e atenção.

A todos aqueles que, de certa forma, me apoiaram neste trabalho.

Ao CNPq e à Fapesp pelo apoio financeiro.

[†]in Memoriam.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Contexto	1
1.2	Motivação	3
1.3	Objetivos	5
1.4	Organização do Trabalho	6
2	Revisão Bibliográfica	7
2.1	A Atividade de Teste	7
2.2	Técnicas e Critérios de Teste de Software	8
2.2.1	Teste Funcional	9
2.2.2	Teste Estrutural	10
2.2.3	Teste Baseado em Erros	11
2.3	Teste de Mutação	13
2.3.1	Aspectos Históricos	13
2.3.2	Passos para Aplicação do Teste de Mutação	14
2.3.2.1	Geração dos Mutantes	15
2.3.2.2	Execução do Programa Original	18
2.3.2.3	Execução dos Mutantes	18
2.3.2.4	Análise dos Mutantes Vivos	19
2.3.3	Teste de Integração	20
2.3.3.1	Erros de Integração	21
2.3.3.2	Critérios para o Teste em Nível de Integração	23
2.3.3.3	O critério Mutação de Interface	23
2.4	Ferramentas para o Teste de Mutação	26
2.5	Estudos Empíricos	27
2.5.1	Redução do Número de Mutantes Gerados	28
2.5.2	Determinação de Mutantes equivalentes	31
2.6	Considerações Finais	37
3	Operadores de Mutação: Uma Avaliação Empírica	39
3.1	Descrição dos Operadores de Mutação	40
3.1.1	Teste de Unidade - <i>Proteum</i>	41

3.1.2	Teste de Integração - <i>PROTEUM/IM</i>	46
3.2	Descrição do Experimento	50
3.2.1	Seleção dos Programas	51
3.2.2	Seleção de Ferramentas de Teste	53
3.2.3	Geração dos Conjuntos de Casos de Teste	54
3.2.4	Coleta e Análise dos Dados	56
3.3	Avaliação dos Operadores de Mutação	57
3.3.1	Operadores de Mutação para o Teste Unidade	60
3.3.2	Operadores de Mutação para o Teste de Integração	73
3.4	Considerações Finais	79
4	Estabelecimento de Estratégias de Teste para Aplicação dos Operadores de Mutação	80
4.1	Descrição do Experimento	81
4.1.1	Coleta e Análise dos Dados	81
4.1.2	Modelo de Ordem Estocástica	83
4.1.2.1	Algoritmo Matemático de Newton Raphson	86
4.2	Estratégias Baseadas no Número de Mutantes Equivalentes	89
4.2.1	Estratégia <i>ESECUS</i> : Teste de Unidade	90
4.2.2	Estratégia <i>ESECIS</i> : Teste de Integração	91
4.3	Estratégias que Priorizam os Operadores Essenciais	95
4.3.1	Estratégia <i>SESECUS</i> : Teste de Unidade	95
4.3.2	Estratégia <i>SESECIS</i> : Teste de Integração	96
4.4	Comparação com Outras Estratégias	97
4.5	Considerações Finais	99
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	101
5.1	Contribuições	103
5.2	Trabalhos Futuros	103

Lista de Figuras

2.1	Passos para Aplicação do Teste de Mutação.	16
2.2	Exemplo de Mutante.	17
2.3	Exemplo de Mutante Equivalente.	19
2.4	Exemplo de Mutante Quase-Equivalente.	20
2.5	Modelo de Falhas causadas por Erros de Integração: (A) Tipo 1; (B) Tipo 2; e (C) Tipo 3.	22
2.6	Representação do Conjunto de Mutantes Requeridos no Teste da Conexão $F - G$	24
2.7	Mutantes Associados às Chamadas de G e F	25
2.8	Conexão entre as unidades F e G	25
2.9	Processo do Teste de Mutação com Dependência de Associações e Análise de Restrições (Harman et al., 2000).	37
3.1	Classificação dos Operadores de Mutação de Constantes	42
3.2	Classificação dos Operadores de Mutação de Comandos	43
3.3	Classificação dos Operadores de Mutação de Operadores	45
3.4	Classificação dos Operadores de Mutação de Variáveis	46
3.5	Classificação dos Operadores de Mutação de Interface - Grupo I	50
3.6	Classificação dos Operadores de Mutação de Interface - Grupo II	51
3.7	Cardinalidade dos Conjuntos de Casos de Teste AM-adequado e MI-adequado	56

Lista de Tabelas

2.1	Detecção de Mutantes Equivalentes - 15 Programas (Offutt & Craft, 1994) . . .	33
2.2	Detecção de Mutantes Equivalentes - 3 Programas (Offutt & Craft, 1994) . . .	33
2.3	Mutantes Equivalentes por Operador - <i>Mothra</i> (Offutt & Craft, 1994)	33
2.4	Detecção de Mutantes Equivalentes - 11 Programas (Offutt & Pan, 1997) . . .	35
2.5	Detecção de Pontos não Executáveis (Offutt & Pan, 1997)	36
3.1	Operadores de Mutação de Constantes	42
3.2	Operadores de Mutação de Comandos	42
3.3	Classificação dos Operadores Binários em C	43
3.4	Operadores de Mutação de Operadores	44
3.5	Operadores de Mutação de Variáveis	45
3.6	Siglas que Formam os Nomes dos Operadores de Mutação para o Teste de Interface	47
3.7	Conjunto de Constantes Requeridas - Mutação de Interface	49
3.8	Operadores de Mutação de Interface - Grupo I	49
3.9	Operadores de Mutação de Interface - Grupo II	50
3.10	Conjunto de Programas Utilizados no Experimento	52
3.11	Complexidade dos Programas: Ferramenta <i>Proteum</i>	52
3.12	Complexidade dos Programas: Ferramenta <i>PROTEUM/IM</i>	52
3.13	Número de Casos de Teste Utilizados por Programa	55
3.14	Construções Típicas de Mutantes Equivalentes	59
3.15	Conjunto de Constantes Requeridas - Mutação de Unidade	60
3.16	Tabela Lógica - Operadores && e &.	63
3.17	Tabela Lógica - Operadores e 	63
3.18	Análise de Inclusão Entre os operadores STRP e SSWM	66
3.19	Funções Utilizadas pelo Operador VDTR	67
3.20	Complexidade dos Operadores de Mutação: Ferramenta <i>Proteum</i>	70
3.21	Operadores de Mutação de Unidade mais Custosos: (a) Mutantes Gerados, (b) Mutantes Equivalentes e (c) Mutantes Q-Equivalentes	73
3.22	Complexidade dos Operadores de Mutação: Ferramenta <i>PROTEUM/IM</i>	77
3.23	Operadores de Mutação de Interface mais Custosos: (a) Mutantes Gerados, (b) Mutantes Equivalentes e (c) Mutantes Q-Equivalentes	78

4.1	Porcentagem de Casos de Teste Necessárias para Matar os Mutantes de cada Operador para um conjunto AM-adequado: Programa Cal	82
4.2	Média para os 11 conjuntos AM-adequados: Programa Cal	83
4.3	Média da Porcentagem de Casos de Teste Necessárias para Matar os Mutantes de cada Operador: 5 Programas	83
4.4	Definições para Aplicação do Algoritmo	84
4.5	Aplicação do Algoritmo de Newton Raphson: Operadores de Unidade	87
4.6	Aplicação do Algoritmo de Newton Raphson: Operadores de Interface	88
4.7	Dados Coletados para um Conjunto de Casos de Teste AM-adequado: Programa Cal.	89
4.8	Aplicação da Estratégia <i>ESECUS</i> : Primeiro Passo	91
4.9	Aplicação da Estratégia <i>ESECUS</i> : Último Passo	92
4.10	Aplicação da Estratégia <i>ESECIS</i> : Primeiro Passo	93
4.11	Aplicação da Estratégia <i>ESECIS</i> : Último Passo	93
4.12	Aplicação da Estratégia <i>SESECUS</i> : Último Passo	96
4.13	Aplicação da Estratégia <i>SESECIS</i> : Último Passo	97
4.14	Conjunto de Casos de Teste Quase Adequado - (Escore de Mutação maior ou igual a 0,99)	98
4.15	Conjunto de Casos de Teste Adequado - (Escore de Mutação igual a 1,00)	98

PARA sistematizar os testes e contornar as restrições de tempo e custo a ele associadas, diversas técnicas, critérios e ferramentas têm sido desenvolvidas. Além disso, visando ao estabelecimento de uma estratégia de teste que apresente baixo custo de aplicação e alta eficácia em revelar a presença de erros, estudos teóricos e empíricos vêm sendo conduzidos pela comunidade de teste. Os critérios de teste, Análise de Mutantes e Mutação de Interface, apresentam problemas de custo relacionados ao grande número de mutantes gerados e equivalentes, sendo de fundamental importância o desenvolvimento de abordagens que viabilizem a sua aplicação prática. O presente trabalho está inserido nesse contexto e tem como objetivo analisar os operadores de mutação implementados nas ferramentas *Proteum* e *PROTEUM/IM*, que apóiam a aplicação dos critérios Análise de Mutantes e Mutação de Interface, respectivamente, levando em consideração não só o número de mutantes gerados mas também o esforço requerido na identificação e eliminação de mutantes equivalentes e mutantes que morrem facilmente. Tal análise permitiu a determinação de heurísticas para eliminação de mutantes equivalentes e o estabelecimento de estratégias incrementais para aplicação dos operadores de mutação, reduzindo com isso o custo do teste em nível de unidade e de integração sem comprometer sua qualidade e contribuindo para a evolução dessas ferramentas para a sua aplicação em ambientes industriais de produção de software.

Abstract

TO systematize testing and to outline the constraints of time and cost associated to testing activity, several techniques, criteria and tools have been developed. Besides, aiming at establishing testing strategies of low cost and high effectiveness in revealing the presence of errors, theoretical and empirical studies have been carried out by the testing community. Testing criteria such as, Mutation Analysis and Interface Mutation, present cost problems related to the large number of mutants and equivalency, being of fundamental importance the development of approaches to make possible their practical application. In this context, the present work aims at analyzing the mutant operators implemented in the *Proteum* and *PROTEUM/IM* tools, that support the application of the Mutation Analysis and Interface Mutation, respectively, considering not only the number of generated mutants but also the effort required in the identification and elimination of equivalent mutants and mutants that die easily. Such analysis allowed the determination of heuristics for elimination of equivalent mutants and the development of incremental strategies to apply mutant operators, reducing the cost of unit and integration testing without compromising quality. This work might also contribute to the evolution of these testing tools and to their application in software production industrial environments.

Introdução

NESTE capítulo são apresentados o contexto dentro do qual este trabalho está inserido, os fatores que motivam a sua realização, e os objetivos a serem atingidos durante o seu desenvolvimento. No final do capítulo também é apresentada uma visão geral da organização desta dissertação.

1.1 Contexto

Sistemas baseados em computação têm sido utilizados em todas as áreas da atividade humana e, como consequência, tem-se exigido uma melhor qualidade do software, adicionando aspectos de qualidade e produtividade à dificuldade e complexidade da atividade de desenvolvimento de software (Maldonado, 1991).

Mesmo com as atividades de garantia de qualidade conduzidas durante todo o processo de desenvolvimento do software, verifica-se que muitos erros permanecem no software pronto. Segundo Harrold (2000), o teste é uma dessas atividades e pode consumir, em alguns casos, cerca de 40 a 50% do custo de desenvolvimento do software. Desse modo é necessário determinar quais casos de teste utilizar a fim de que a maioria dos erros existentes possa ser encontrada e que o número de casos de teste utilizados não seja tão grande a ponto de ser impraticável.

Na tentativa de reduzir os custos e aumentar a qualidade da atividade de teste, várias técnicas e critérios têm sido propostos. A diferença entre essas técnicas está na origem da informação

que é utilizada para avaliar ou construir conjuntos de casos de teste, sendo que cada técnica possui uma variedade de critérios para esse fim. Na Técnica Funcional (caixa preta) os requisitos de teste são obtidos a partir da especificação; na Técnica Estrutural (caixa branca) derivam-se os requisitos a partir da implementação do software; e na Técnica Baseada em Erros os elementos requeridos para caracterizar a atividade de teste são baseados em erros comuns que podem ocorrer durante o processo de desenvolvimento de software.

Dentro do contexto da Engenharia de Software, a atividade de teste, do ponto de vista procedimental, pode ser considerada como uma seqüência de três passos. O primeiro deles é o teste de unidade, no qual cada unidade do software é testada individualmente, buscando-se evidências de que ela funcione adequadamente. O próximo passo, o teste de integração, é uma atividade sistemática para integrar as unidades componentes da estrutura do software, visando a identificar erros de interação entre elas. Finalizando, o teste de sistema verifica se todos os elementos do sistema combinam-se adequadamente e se a função/desempenho global do mesmo é atingida (Pressman, 2000).

Existem mecanismos para a seleção sistemática de um subconjunto do domínio de entrada do programa em teste, de modo que este seja eficaz na detecção dos erros existentes, conhecidos como critérios de teste. Em geral, a partir de um dado critério de teste podem-se obter infinitos subconjuntos de casos de teste adequados ao programa em questão.

Segundo (Maldonado, 1991), as técnicas e teste devem ser vistas como complementares e a questão que se coloca está em como utilizá-las de forma que as vantagens de cada uma sejam melhor exploradas em uma estratégia de teste que leve a um teste de boa qualidade, ou seja, eficaz em revelar a presença de erros e de baixo custo. As técnicas e critérios de teste fornecem ao desenvolvedor uma abordagem sistemática e teoricamente fundamentada, além de constituírem um mecanismo de auxílio para avaliar a qualidade e adequação da atividade de teste.

Para que os testes sejam conduzidos de forma satisfatória e livre de erros que possam ser introduzidos devido à intervenção humana, o desenvolvimento de ferramentas que buscam automatizar essa atividade é fundamental. Além disso, a disponibilidade de ferramentas de teste oferece recursos para o desenvolvimento de estudos empíricos de forma a avaliar o custo e a eficácia das técnicas e critérios de teste nos quais as ferramentas se baseiam. Pode-se identificar um grande esforço da comunidade de teste nessa direção (Mathur & Wong, 1993; Offutt et al., 1993; DeMillo et al., 1995; Offutt & Craft, 1994; Offutt & Lee, 1994; Wong et al., 1994a,b; Offutt et al., 1996a,b; Souza, 1996; Offutt & Pan, 1997; Wong et al., 1997; Barbosa, 1998; Vincenzi, 1998; Harman et al., 2000; Maldonado et al., 2000; Delamaro et al., 2001; Jorge et al., 2001; Vincenzi et al., 2001)

Uma das linhas de atuação do Grupo de Engenharia de Software do ICMC/USP, em colaboração com o Grupo de Teste do DCA/FEEC/UNICAMP e o Laboratório de Engenharia de

Software do DIN/UEM, é o estudo de princípios, estratégias, métodos e critérios de teste e validação na produção de software, bem como na especificação e implementação de ferramentas que apoiem a realização das atividades de teste e viabilizem a avaliação do aspecto complementar dos critérios, por meio de estudos teóricos e empíricos.

Dentro desse contexto, algumas das ferramentas de teste desenvolvidas são: a *Poketool* (Maldonado et al., 1989; Chaim, 1991), a *Proteum* (Delamaro, 1993; Delamaro & Maldonado, 1993) e a *PROTEUM/IM* (Delamaro, 1997)- que apoiam os critérios Potenciais-Usos (Maldonado, 1991), Análise de Mutantes (DeMillo et al., 1978) e Mutação de Interface (Delamaro et al., 2001), respectivamente. A implementação dessas ferramentas viabilizou o início de trabalhos comparativos entre os critérios de teste Funcional, Estrutural e Baseado em Erros, bem como o estudo e avaliação de variantes para o Teste de Mutação (Souza, 1996; Delamaro, 1997; Wong et al., 1997; Barbosa, 1998; Vincenzi, 1998; Fondazzi, 1999; Sugeta, 1999; Simão, 2000; Delamaro et al., 2001).

1.2 Motivação

Dentre os critérios de teste que tem se destacado estão os critérios Baseados em Fluxo de Dados e os critérios Baseados em Mutação (Teste de Mutação). Neste trabalho ênfase é dada ao Teste de Mutação.

O Teste de Mutação surgiu na década de 70 na *Yale University* e *Georgia Institute of Technology* (DeMillo et al., 1978) e vários trabalhos empíricos e teóricos têm indicado que o Teste de Mutação é atrativo para o teste de programas devido a sua eficácia em revelar a presença de erros (Budd et al., 1980; Mathur, 1991; Mathur & Wong, 1993; Wong, 1993; Wong & Mathur, 1995a,b; Offutt et al., 1996a,b; Barbosa, 1998; Vincenzi, 1998; Delamaro et al., 2001). Além da eficácia em revelar a presença de erros, outra qualidade do Teste de Mutação é sua flexibilidade no sentido de poder ser estendido para diversas entidades executáveis: programas (DeMillo et al., 1978; Delamaro, 1997) e especificações (Fabbri et al., 1993; Woodward, 1993; Fabbri et al., 1994, 1995; Fabbri, 1996; Sugeta, 1999; Simão, 2000; Sridhanan et al., 2000). Essa flexibilidade vem do fato de que, para se aplicar o Teste de Mutação, é necessária a existência de um modelo que seja executável e que aceite uma entrada e produza uma saída que possa ser comparada com a saída do mutante. Além disso, é necessária a definição de um conjunto de operadores de mutação responsável pela representação do modelo de erros correspondente à entidade executável em questão.

Especificamente para o teste de programas, o Teste de Mutação pode ser utilizado no teste de unidade (denominado Análise de Mutantes) e no teste de integração (denominado Mutação de Interface).

Nessa Dissertação, quando nenhuma distinção for necessária, o termo Teste de Mutação é utilizado para referenciar ambos os critérios.

Basicamente, a idéia do Teste de Mutação é criar a confiança de que um programa P está correto, produzindo-se por meio de pequenas alterações sintáticas, um conjunto de programas chamados de mutantes semelhantes a P , e construindo-se casos de teste capazes de provocar diferenças de comportamento entre P e seus mutantes. Essas alterações são feitas com base em um conjunto de operadores de mutação. A cada operador pode-se associar um tipo ou uma classe de erros que se pretende revelar. A aplicação do critério consiste de quatro etapas principais:

1. Geração de mutantes;
2. Execução do programa P com um conjunto de casos de teste T ;
3. Execução dos mutantes com T ; e
4. Análise dos mutantes.

O objetivo é achar um conjunto de casos de teste T' que consiga matar todos os mutantes não equivalentes à P , ou seja, fazer com que esses mutantes tenham um comportamento distinto de P com algum caso de teste de T . Tais conjuntos são considerados adequados para o teste de P , no sentido de que ou P está correto ou contém algum erro sutil e inesperado, o que deve ser raro se as modificações usadas para criar os mutantes forem cuidadosamente escolhidas.

O Teste de Mutação fornece uma medida objetiva do nível de confiança da adequação dos casos de teste analisados. Com base no escore de mutação, que relaciona o número de mutantes gerados com o número de mutantes mortos, pode-se avaliar a adequação dos casos de teste usados e, como consequência, a confiabilidade do programa testado.

As ferramentas *Proteum* (Delamaro, 1993; Delamaro & Maldonado, 1993) e *PROTEUM/IM* (Delamaro, 1997) foram desenvolvidas no Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação - ICMC/USP e apóiam o Teste de Mutação em nível de unidade e de integração, respectivamente. Estas ferramentas foram utilizadas no desenvolvimento desse trabalho por serem as únicas ferramentas existente atualmente que apóiam o Teste de Mutação para programas escritos em linguagem C. Para o nível de unidade, a *Proteum* possui um conjunto de 71 operadores de mutação. Para o teste de integração foram definidos e implementados 33 operadores de mutação na ferramenta *PROTEUM/IM*.

O principal problema para a aplicação de critérios baseados em mutação está relacionado com o seu custo. O primeiro aspecto deste problema está diretamente relacionado com o grande número de mutantes que pode ser gerado mesmo para programas simples. Entre as pesquisas para contornar este aspecto de custo dos critérios, têm sido investigadas abordagens para a

redução do número de mutantes gerados. Uma linha interessante é a caracterização de um subconjunto de operadores de mutação que apresente o mesmo grau de adequação e eficácia, mas a um custo menor. Os critérios caracterizados por esses subconjuntos têm sido denominados de Mutação Restrita (*Constrained Mutation*) (Wong, 1993; Offutt et al., 1996a; Barbosa, 1998). Também tem sido objetivo dessas pesquisas o estabelecimento de estratégias de teste incrementais que explorem as diversas características dos critérios, partindo-se inicialmente de critérios “mais fracos” e talvez menos eficazes para a avaliação da adequação do conjunto de casos de teste, e em função da disponibilidade de orçamento e de tempo, incrementalmente, procurando-se satisfazer critérios mais “fortes” e eventualmente mais eficazes, porém, em geral, mais caros (Vincenzi, 1998).

O segundo aspecto restritivo quanto ao custo de aplicação dos critérios refere-se ao esforço para a determinação dos mutantes equivalentes que, em geral, requer a intervenção do testador ou a elaboração de heurísticas (Offutt & Craft, 1994; Offutt & Pan, 1997; Harman et al., 2000). Assim, a determinação de um conjunto essencial de operadores deve levar em consideração não somente aspectos de cobertura e eficácia mas também o custo associado à probabilidade de criação de mutantes equivalentes.

Este trabalho está em consonância com os trabalhos desenvolvidos pelo Grupo de Engenharia de Software do ICMC, e objetiva contribuir para a determinação de formas alternativas e de baixo custo para a aplicação dos critérios baseados em mutação. E também está inserido no contexto do projeto de pesquisa - CNPq: Teste de Mutação: Análise e Definição de Estratégias de Teste e Validação de Software.

1.3 Objetivos

O trabalho tem como objetivo analisar teórica e empiricamente os operadores de mutação implementados nas ferramentas *Proteum* e *PROTEUM/IM*, visando a diminuir o custo de aplicação dos critérios Análise de Mutantes e Mutação de Interface. Especificamente, são investigados dois aspectos: 1) determinação de mutantes equivalentes, por meio de inclusão de operadores e definição de heurísticas; 2) efetividade dos operadores, determinando quais operadores geram mutantes que morrem facilmente, ou seja, mutantes que morrem com grande quantidade de casos de teste. Com base nesses dados, são estabelecidas estratégias incrementais para aplicação dos operadores de mutação mantendo-se a eficácia e reduzindo-se o custo dos critérios baseados em mutação em relação ao número de mutantes equivalentes.

Devido aos problemas de custo, tanto em relação ao grande número de mutantes gerados quanto à determinação de mutantes equivalentes, o desenvolvimento de estratégias para aplicação dos operadores de mutação, levando-se em consideração esses dois aspectos, é de funda-

mental importância para viabilizar a aplicação dos mesmos em ambientes reais de desenvolvimento de software.

1.4 Organização do Trabalho

Neste capítulo foi apresentado o contexto no qual este trabalho se insere, as motivações para a sua realização e seus objetivos. No Capítulo 2 são apresentadas as fases da atividade de teste e as principais técnicas e critérios de teste existentes. Também são apresentados os critérios Análise de Mutantes e Mutação de Interface, ferramentas para aplicação de testes baseados em mutação e alguns estudos empíricos que têm como objetivo reduzir o custo de aplicação desses critérios. No Capítulo 3 é apresentado o experimento para a avaliação dos operadores de mutação para o teste de unidade e integração com o estabelecimento de heurísticas para determinação de mutantes equivalentes. No Capítulo 4 são definidas estratégias incrementais para aplicação dos operadores de mutação dos critérios Análise de Mutantes e Mutação de Interface baseadas no número de mutantes equivalentes e na dificuldade de distinguir os mutantes gerados por um determinado operador de mutação e o Capítulo 5 apresenta as contribuições deste trabalho e perspectivas para trabalhos futuros.

Revisão Bibliográfica

NESTE capítulo são apresentados alguns conceitos envolvendo a atividade de teste. Inicialmente, são feitas considerações a respeito da importância do teste durante o processo de desenvolvimento, em seguida são apresentadas as fases do teste e as principais técnicas e critérios que podem ser utilizadas em cada uma delas. Os critérios Análise de Mutantes e Mutação de Interface, dois critérios da Técnica Baseada em Erros, também são descritos por constituírem o alvo do presente trabalho. A importância da existência de ferramentas automatizadas que auxiliem na condução dos testes também é discutida e identificadas as principais ferramentas para a atividade de teste que utilizam técnicas baseadas em mutação.

Finalmente é apresentada uma síntese dos principais estudos empíricos utilizando-se os critérios baseados em mutação, cujos resultados motivam a realização deste trabalho.

2.1 A Atividade de Teste

O processo de desenvolvimento de software envolve uma série de atividades nas quais, apesar dos métodos, técnicas e ferramentas empregados, erros ainda podem ocorrer. Com isso, a atividade de teste é de fundamental importância para a identificação e eliminação de erros que persistem, representando a última revisão da especificação, projeto e codificação (Pressman, 2000).

Segundo Myers (1979), a atividade de teste é o processo de executar um programa com a intenção de encontrar um erro; um bom caso de teste é aquele que tem alta probabilidade de

revelar erros e um teste bem sucedido é aquele que detecta a existência de um erro ainda não descoberto.

A realização dos testes é composta das seguintes etapas: construção dos casos de teste, execução do programa P com esses casos de teste e análise do comportamento de P a fim de determinar se o mesmo está correto ou não. Tal procedimento se repete até que o testador tenha confiança de que P comporta-se conforme o esperado com o mínimo de erros possível ou até que um erro seja descoberto (Souza, 1996).

Segundo Pressman (2000), a atividade de teste deve ser conduzida em três fases: teste de unidade, teste de integração e teste de sistema. O teste de unidade concentra-se no esforço de verificação da menor parte de projeto de software chamada de módulo ou unidade¹. O teste de integração é uma atividade sistemática para a construção da estrutura de programa, visando à descobrir erros associados às interações entre as unidades. O objetivo é, a partir dos módulos testados no nível de unidade, construir a estrutura de programa que foi determinada pelo projeto. O teste de sistema, realizado após a integração do sistema, visa a identificar erros de funções e características de desempenho que não estejam de acordo com a especificação.

Um dos pontos críticos da atividade de teste é a escolha dos casos de teste a serem aplicados. O programa, para ser demonstrado correto, deveria ser exercitado com todos os valores possíveis do domínio de entrada. Sabe-se, entretanto, que o teste exaustivo é impraticável devido a restrições de tempo e custo para realizá-lo, sendo necessário determinar um conjunto de casos de teste que seja eficaz em encontrar erros cuja cardinalidade seja reduzida (Myers, 1979). Com esse objetivo várias técnicas e critérios de teste têm sido elaborados.

2.2 Técnicas e Critérios de Teste de Software

Na tentativa de reduzir os custos associados ao teste, é fundamental a aplicação de técnicas que indiquem como testar o software e de critérios que respondam quando parar os testes, de forma que essa atividade possa ser conduzida de modo planejado e sistemático (Demillo, 1980).

Critérios de teste têm sido elaborados com o objetivo de fornecer uma maneira sistemática e rigorosa para selecionar um subconjunto do domínio de entrada e ainda assim ser eficaz para revelar a presença de erros, respeitando as restrições de tempo e custo associados a um projeto de software. Esses critérios são classificados em três técnicas de testes: Técnica Funcional, Técnica Estrutural e a Técnica Baseada em Erros. A diferença entre as três técnicas é a origem da informação usada para avaliar ou para construir conjuntos de casos de teste (Maldonado, 1991).

Segundo Pressman (2000), nenhuma das técnicas de teste é completa, no sentido que nenhuma delas é, em geral, suficiente para garantir a qualidade da atividade de teste. Essas diferentes

¹ Usaremos neste trabalho o termo unidade.

técnicas são complementares e devem ser aplicadas em conjunto para assegurar um teste de boa qualidade.

Apesar das limitações da atividade de teste, sua aplicação de maneira sistematizada e bem planejada pode garantir ao software algumas características mínimas que são importantes no estabelecimento da qualidade do produto e relevantes também para o seu processo de evolução. Além disso, é importante lembrar que o teste é, em geral, apenas uma atividade de validação e que sua utilização isolada não é suficiente para alcançar um produto de boa qualidade. Outras técnicas, tais como: inspeção, “*walkthrough*” e verificação formal, devem ser utilizadas em conjunto com a atividade de teste.

2.2.1 Teste Funcional

Essa técnica é também conhecida como teste de caixa preta pelo fato de tratar o software como uma caixa na qual o conteúdo é desconhecido e da qual só é possível visualizar o lado externo, ou seja, os dados de entrada fornecidos e as respostas produzidas como saída.

Nesta técnica são verificadas as funções do sistema sem se preocupar com detalhes de implementação. Para isto, Coward (1988) distingue no teste funcional dois passos principais:

1. Identificar as funções esperadas do software; e
2. Criar casos de teste que chequem a realização das funções determinadas.

Segundo Pressman (2000), o teste de caixa preta é uma abordagem que procura revelar erros das seguintes categorias:

- Funções incorretas ou ausentes;
- Erros de interface;
- Erros nas estruturas de dados ou no acesso a banco de dados externos;
- erros de desempenho; e
- erros de inicialização e término.

As funções que o software possui são identificadas a partir de sua especificação, sendo essencial para o teste funcional uma especificação correta e de acordo com os requisitos do usuário (Demillo, 1987).

Os critérios de teste funcional mais conhecidos são:

- **Particionamento em Classes de Equivalência** é um critério de teste funcional que divide o domínio de entrada de um programa em classes, a partir das quais os casos de teste podem ser selecionados. O objetivo é minimizar o número de casos de teste, obtendo-se somente casos de teste essenciais. O uso de particionamento permite examinar os requisitos com mais detalhes e restringir o número de casos de teste;
- **Análise do Valor Limite (BVA-Boundary Value Analysis)** é um complemento ao critério Particionamento em Classes de Equivalência. Em vez de selecionar qualquer elemento de uma classe de equivalência, a BVA leva à seleção de casos de teste nas “extremidades” da classe. Em vez de se concentrar somente nas condições de entrada, a BVA deriva os casos de teste também do domínio de saída (Myers, 1979);
- **Grafo de Causa e Efeito** é utilizado quando se necessita testar o efeito combinado de dados de entrada. Causas e efeitos são identificados e combinados em um grafo. Esse grafo é convertido em uma tabela de decisão que é utilizada na construção dos casos de teste; e
- **Error Guessing** é um outro critério funcional, onde os possíveis erros são listados e casos de teste são construídos baseados nesta lista.

Em geral, o teste funcional é uma técnica de validação de programas na qual os casos de teste são gerados a partir da especificação dos requisitos, tornando-se uma técnica sujeita às inconsistências que podem ocorrer na especificação (Demillo, 1987). Outro problema encontrado com a utilização dessa técnica é a dificuldade de quantificar a atividade de teste, visto que não se pode garantir que partes essenciais ou críticas do programa sejam executadas.

2.2.2 Teste Estrutural

Essa técnica de teste também é conhecida como teste de caixa branca, pois os requisitos de teste inspecionados por esta são baseados na implementação.

Segundo Pressman (2000), o teste de caixa branca do software baseia-se em um minucioso exame dos detalhes procedimentais. O “*status* do programa” pode ser examinado em vários pontos para determinar se o *status* esperado ou estabelecido corresponde ao “*status* real”. Esta técnica de teste é baseada no conhecimento da estrutura interna da implementação; a maioria dos critérios dessa técnica utiliza uma representação de programa conhecida como grafo de fluxo de controle ou grafo de programa. Um grafo de fluxo de controle é um grafo orientado onde cada vértice representa um bloco indivisível de comandos e cada aresta representa um desvio de um bloco para outro. Um bloco desse tipo tem as seguintes características: não existem desvios para o meio do bloco e uma vez que o primeiro comando do bloco seja executado, todos

os demais comandos do bloco são executados sequencialmente. Através do grafo de programa escolhem-se as estruturas que devem ser executados.

Como exemplos de critérios de teste estrutural têm-se (Pressman, 2000):

- **CrITÉrios Baseados na Complexidade:** utilizam informações sobre a complexidade do programa para determinar os requisitos de teste. Um critério bastante conhecido desta classe é o critério de **McCabe** que utiliza a complexidade ciclomática para derivar os requisitos de teste. Essencialmente, esse critério requer que seja executado um conjunto de caminhos linearmente independente do grafo de programa (Pressman, 2000).
- **CrITÉrios Baseados em Fluxo de Controle:** utilizam apenas características de controle de execução do programa, como comandos ou desvios, para determinar quais estruturas são necessárias. Os mais conhecidos são os critérios Todos-Arcos, Todos-Nós e Todos-Caminhos. Os critérios Todos-Nós e Todos-Arcos exigem que a execução do programa passe pelos menos uma vez em cada vértice do grafo de fluxo (ou que cada comando do programa seja executado pelo menos uma vez), e que cada aresta do grafo (cada desvio do programa) seja exercitado pelo menos uma vez, respectivamente. Já o critério Todos-Caminhos que, em geral, é impraticável, requer que todos os caminhos possíveis do programa sejam executados (Pressman, 2000). Um caminho é executável se existe um conjunto de valores que possa ser atribuído às variáveis de entrada do programa e que causa a execução desse caminho; caso contrário, esse caminho é dito não executável (Frankl, 1987).
- **CrITÉrios Baseados em Fluxo de Dados:** utilizam informações do fluxo de dados do programa para derivar os requisitos de teste. Esses critérios selecionam caminhos de teste de um programa de acordo com as localizações das definições (pontos em que as variáveis recebem um valor) e usos (pontos em que os valores das variáveis são utilizados) de variáveis no programa. Exemplos dessa classe de critérios são os critérios de (Rapps & Weyuker, 1982, 1985) e os critérios Potenciais-Usos (Maldonado, 1991).

2.2.3 Teste Baseado em Erros

A técnica de teste baseada em erros utiliza informações sobre os erros mais frequentes cometidos no processo de desenvolvimento de software e sobre os tipos específicos de erros que se desejam localizar (Demillo, 1987). A ênfase da técnica está nos erros que o programador ou projetista pode cometer durante o desenvolvimento e nas abordagens que podem ser usadas para detectar a sua ocorrência.

Semeadura de Erros (*Error Seeding*), Análise de Mutantes (*Mutation Analysis*) e Mutação de Interface (*Interface Mutation*) são critérios típicos que se concentram em erros.

No critério Semeadura de Erros, uma quantidade conhecida de erros é semeada artificialmente no programa. Após o teste, do número total de erros encontrados verificam-se quais são naturais e quais são artificiais. Usando estimativas de probabilidade, o número de erros naturais ainda existentes no programa pode ser calculado (Budd, 1981).

Dentre os problemas para a aplicação deste critério estão:

1. Os erros artificiais podem interagir com os naturais fazendo com que os erros naturais sejam “mascarados” pelos erros semeados;
2. Para obter-se um resultado estatístico não questionável é necessário o uso de programas capazes de conter 10.000 erros ou mais; e
3. É preciso assumir que os erros estão distribuídos pelo programa de maneira uniforme, o que, em geral, não é verdade. Programas reais apresentam longos trechos de programas com código simples e poucos erros, e pequenos trechos com alta complexidade e alta concentração de erros (Budd, 1981).

O Teste de Mutação, também baseado em erros, utiliza um conjunto de programas ligeiramente modificados (mutantes) obtidos a partir do programa em teste. O objetivo é encontrar um conjunto de casos de teste capaz de revelar as diferenças existentes entre o programa original e seus mutantes (Demillo, 1987).

Considerando o critério Análise de Mutantes, dois outros critérios que podem ser derivados são a Mutação Fraca (*Weak Mutation*) (Howden, 1982) e a Mutação Firme (*Firm Mutation*) (Woodward & Halewood, 1988). A idéia básica dos critérios Mutação Fraca, Mutação Firme e Mutação Forte (como usa Howden (1982) para se referir à Análise de Mutantes) é a mesma, ou seja, uma pequena mudança no programa é realizada e os resultados da versão original são comparados com os da versão modificada. A diferença está no momento da criação do mutante e no momento em que se comparam os resultados obtidos para decidir se o mutante “morre” ou continua “vivo”. Na Mutação Fraca cria-se o mutante imediatamente antes da execução de um comando e os resultados são comparados logo após o término da execução do comando. Na Mutação Forte geram-se os mutantes antes do início da execução do programa e comparam-se os resultados após o término de sua execução. Já a Mutação Firme, definida como um critério entre a Mutação Fraca e a Mutação Forte, realiza alterações no programa e introduz pontos nos quais os estados do programa original e do programa mutante são comparados antes do final da execução (Woodward & Halewood, 1988).

2.3 Teste de Mutação

Esta sessão apresenta dois critérios baseados em erros: Análise de Mutantes e Mutação de Interface, que permitem a aplicação do Teste de Mutação em nível de unidade e de integração, respectivamente.

2.3.1 Aspectos Históricos

O Teste de Mutação surgiu na década de 70 na *YALE University* e no *Georgia Institute of Technology*, possuindo um forte relacionamento com um método clássico para detecção de erros lógicos em circuitos digitais, conhecido como modelo de teste de falha única (DeMillo et al., 1978; Budd et al., 1980; Demillo, 1980; Budd, 1981).

Segundo Demillo (1987), um conjunto de teste pode ser considerado adequado se o programa funciona corretamente quando executado com os casos de teste e se todos os programas incorretos têm um comportamento não esperado em relação a algum caso de teste. Dessa forma, o objetivo inicial do Teste de Mutação é de servir como um meio de medir o quanto um conjunto de casos de teste é adequado a um determinado programa, sendo também demonstrado por DeMillo et al. (1978), sua eficácia na detecção de erros.

Observou-se no final dos anos 80 uma intensificação de trabalhos na área, iniciando com o desenvolvimento da ferramenta conhecida como *Mothra* (DeMillo et al., 1988; Choi et al., 1989) que é um ambiente de teste para programas na linguagem *Fortran-77*, no qual existem 22 operadores de mutação implementados para o teste de unidade (Análise de Mutantes). A interface utilizada é baseada em janelas, o que facilita a realização dos testes; permite incorporar outras ferramentas como gerador de casos de teste, verificador de equivalência e oráculo.

Em 1991, DeMillo & Offutt (1991) desenvolveram uma ferramenta para geração automática de dados de teste chamada *Godzilla*, a qual gera dados de teste próximos da adequação, utilizando um esquema de restrições (*constraint-based automatic test data generation*). Essa ferramenta hoje se encontra acoplada à ferramenta de teste *Mothra*.

Outro avanço na área foi o desenvolvimento da ferramenta *Proteum* (Delamaro, 1993; Delamaro & Maldonado, 1993) que realiza teste em programas desenvolvidos na linguagem *C* em nível de unidade.

Vários critérios têm sido propostos a fim de avaliar a qualidade dos casos de teste, podendo-se citar os critérios de Fluxo de Dados e critérios Baseados em Mutação como alguns dos mais promissores nesse aspecto. A maioria desses critérios, no entanto, estava restrita ao teste de unidade (Harrold & Soffa, 1991), sendo que no teste de integração, em geral, aplica-se apenas o teste funcional. Porém, em 1997 Delamaro propôs o critério Mutação de Interface (Delamaro, 1997; Delamaro et al., 2001) que possui as mesmas características do critério Análise de

Mutantes para o teste de integração. Para apoiar a aplicação do critério Mutações de Interface, Delamaro desenvolveu a ferramenta *PROTEUM/IM* (Delamaro, 1997) que testa a interação entre as unidades de programas desenvolvidos na linguagem C.

Hoje as ferramentas *Proteum* e *PROTEUM/IM* estão integradas em um único ambiente denominado *PROTEUM/IM 2.0* (Delamaro et al., 2000). Essa ferramenta aplica tanto o teste de unidade quanto o teste de integração.

Com essas ferramentas hoje tem-se investido muito em estudos empíricos para avaliar e aprimorar os critérios Análise de Mutantes e Mutações de Interface (Mathur & Wong, 1993; Offutt et al., 1993; DeMillo et al., 1993; Offutt & Lee, 1994; Wong et al., 1994a,b; Offutt et al., 1996b; Offutt & Craft, 1994; Offutt et al., 1996a; Souza, 1996; Offutt & Pan, 1997; Wong et al., 1997; Barbosa, 1998; Vincenzi, 1998; Fondazzi, 1999; Harman et al., 2000; Maldonado et al., 2000; Barbosa et al., 2001; Delamaro et al., 2001; Jorge et al., 2001; Vincenzi et al., 2001)

2.3.2 Passos para Aplicação do Teste de Mutações

A idéia básica da técnica apresentada por DeMillo et al. (1978), conhecida como **hipótese do programador competente** (*competent programmer hypothesis*), assume que programadores experientes escrevem programas próximos do correto. Considerando a validade dessa hipótese, pode-se afirmar que erros são introduzidos nos programas através de pequenos desvios sintáticos que alteram a semântica do programa e, conseqüentemente, conduzem o programa a um comportamento incorreto. Para revelar tais erros, o Teste de Mutações identifica os desvios sintáticos mais comuns e, através da aplicação de pequenas transformações sobre o programa em teste, encoraja o testador a construir casos de testes que mostrem que tais transformações levam a um programa incorreto (Agrawal et al., 1989).

Uma outra hipótese explorada na aplicação do Teste de Mutações é o **efeito de acoplamento** (*coupling effect*) (DeMillo et al., 1978), a qual assume que erros complexos estão relacionados a erros simples. Dessa forma, espera-se, e alguns estudos já confirmaram esta hipótese (Budd et al., 1980; Wah, 2000), que conjuntos de casos de teste capazes de revelar erros simples sejam também capazes de revelar erros complexos.

Primeiramente o testador deve fornecer um programa P a ser testado e um conjunto de casos de teste T cuja adequação deseja-se avaliar. O programa é executado com T e, se apresentar resultados incorretos, então um erro foi revelado e o teste termina. Caso contrário, o programa ainda pode conter erros que o conjunto T não conseguiu revelar. O programa P sofre então pequenas alterações, dando origem aos programas $P_1, P_2 \dots P_n$, que são mutantes de P , diferindo deste apenas pela ocorrência de erros simples, ou seja, cada mutante contém apenas uma mutação.

A seguir, os mutantes são executados com o mesmo conjunto de casos de teste T . Os mutantes que apresentam resultados diversos de P , para algum caso de teste, é dito “morto”. Os demais são considerados vivos e entre estes existem os mutantes equivalentes, para os quais não existe um valor do domínio de entrada que diferencie seu resultado de P .

Através do escore de mutação (*mutation score*), que relaciona o número de mutantes mortos com o número de mutantes gerados, o Teste de Mutação fornece uma medida objetiva do nível de adequação dos casos de teste analisados. O escore de mutação é calculado da seguinte forma:

$$ms(P, T) = \frac{DM(P, T)}{M(P) - EM(P)}$$

Sendo:

$DM(P, T)$: total de mutantes mortos pelo conjunto de casos de teste T ;

$M(P)$ total de mutantes gerados a partir do programa P ;

$EM(P)$: total de mutantes equivalentes ao programa P .

O escore de mutação varia no intervalo $[0, 1]$ sendo que, quanto maior o escore, mais adequado é o conjunto de casos de teste para o programa sendo testado. Percebe-se com essa fórmula que apenas $DM(P, T)$ depende do conjunto de casos de teste utilizado e que $EM(P)$ é obtido à medida que se decide que determinado mutante vivo é equivalente. Em geral, a equivalência entre programas é uma questão indecidível; no entanto, alguns métodos e heurísticas têm sido propostos para determinar a equivalência de programas em uma grande porcentagem dos casos de interesse (Offutt & Craft, 1994; Offutt & Pan, 1997; Harman et al., 2000).

Dados um programa P e um conjunto de casos de teste T cuja qualidade deseja-se avaliar, pode-se aplicar o Teste de Mutação através dos seguintes passos:

1. Geração dos Mutantes;
2. Execução do Programa Original (P);
3. Execução do Mutantes; e
4. Análise dos Mutantes Vivos.

A Figura 2.1 ilustra a relação entre cada um dos passos apresentados para a aplicação do Teste de Mutação que serão melhor detalhados a seguir.

2.3.2.1 Geração dos Mutantes

O sucesso da aplicação do Teste de Mutação depende do conjunto de mutantes gerados a partir de determinado programa P . Segundo Delamaro (1993) esse conjunto deve apresentar as seguintes características:

Figura 2.1: Passos para Aplicação do Teste de Mutação.

- Ser abrangente, de modo que um conjunto de casos de teste que satisfaça o Teste de Mutação, ou em outras palavras, que seja adequado para P em relação a $F(P)$, consiga revelar a maior parte dos erros de P ; e
- Ter cardinalidade pequena, para que o problema de gerar ou verificar se um conjunto de casos de teste é ou não adequado, seja tratável.

Os mutantes são gerados através da aplicação de operadores de mutação no programa P sendo testado. Entende-se por operador de mutação (*mutant operators*) as regras que definem as alterações que devem ser aplicadas no programa original P . A aplicação de um operador de mutação gera, na maioria das vezes, mais que um mutante, visto que P pode conter várias

entidades que estão no domínio de um operador e, desse modo, o operador é aplicado a cada uma dessas entidades, uma de cada vez.

Os operadores de mutação são construídos para satisfazer um entre dois propósitos (Offutt et al., 1996a):

1. Induzir mudanças sintáticas simples com base nos erros típicos cometidos pelos programadores (como trocar o nome de uma variável); ou
2. Forçar determinados objetivos de teste (como executar cada arco do programa).

Além dos tipos de erros que se desejam revelar e da cobertura que se quer garantir, a escolha de um conjunto de operadores de mutação depende fortemente da linguagem em que os programas a serem testados estão escritos. Em (DeMillo et al., 1988) encontra-se a relação de 22 operadores de mutação utilizados por um sistema de mutação, chamado *Mothra*, para programas em *Fortran-77*. Já para a linguagem *C*, a ferramenta *Proteum* conta com 71 operadores de mutação e, para o teste de programas *C* em nível de integração, a ferramenta *PROTEUM/IM* possui 33 operadores de mutação.

A Figura 2.2 apresenta um trecho de programa, utilitário do sistema operacional UNIX chamado *Sort*, e um exemplo de mutante gerado a partir da aplicação de um operador de mutação.

<pre>if(a != nfiles) { oldfile(); merge(a, nfiles); }</pre>	Programa Original
<pre>if(a == nfiles) { oldfile(); merge(a, nfiles); }</pre>	Mutante

Figura 2.2: Exemplo de Mutante.

A princípio, é possível a aplicação de mais de um operador de mutação de uma só vez para a geração de mutantes. Mutantes gerados a partir de k alterações simultâneas no programa P em teste são ditos mutantes de ordem k . O estudo realizado por Budd et al. (1980) mostra que mutantes de ordem superior a 1, além de não contribuírem de forma significativa para a construção de casos de teste melhores, têm um custo de geração e execução demasiadamente alto. Dessa maneira, apenas mutantes de primeira ordem têm sido utilizados no Teste de Mutação.

2.3.2.2 Execução do Programa Original

Deve-se executar o programa original P para os casos de teste seleccionados e verificar se o resultado é o esperado. Caso o programa apresente um comportamento diferente para algum caso de teste, então um erro foi descoberto e o processo termina. Se nenhum caso de teste revelar erro, o teste continua no passo seguinte. A tarefa de oráculo, que é decidir se o resultado está correto ou não, geralmente é desempenhada pelo testador.

2.3.2.3 Execução dos Mutantes

Neste passo, cada um dos mutantes é executado usando os casos de teste de T . Se um mutante M apresenta resultado diferente de P , isto significa que os casos de teste utilizados são sensíveis e conseguiram expor a diferença entre P e M ; neste caso, M é dito estar morto e é descartado. Por outro lado, se M apresenta comportamento igual a P , isto indica ou uma fraqueza de T , pois não conseguiu distinguir P de M , ou indica que P e M são equivalentes; neste caso, diz-se que M continua vivo.

Existem alguns problemas relacionados com este passo do Teste de Mutação. Um deles é decidir se um mutante está morto ou vivo. Mais precisamente, determinar quais entidades devem ser comparadas para decidir se o comportamento do mutante e do programa original são os mesmos.

A opção mais simples é capturar as seqüências de caracteres enviadas pelos programas para os dispositivos de saída e comparar as seqüências produzidas pelo programa original e pelos mutantes.

Além disso, outros pontos podem ser usados para tentar distinguir o comportamento dos programas. O código de retorno, que corresponde ao valor que indica se a execução terminou normalmente ou qual foi a causa do termino, é também usado com esse propósito.

Se o tempo de execução de um mutante ultrapassa muito o tempo de execução do programa original, isso pode indicar que a alteração fez com que o mutante entrasse em um laço infinito. Então, nesse caso o mutante deve também ser considerado morto por “*timeout*”.

Assim, decidir quais “saídas” devem ser monitoradas é mais uma questão de implementação do sistema de mutação do que uma característica intrínseca do Teste de Mutação. Não são bem claras quais são as conseqüências de escolher-se como parâmetro de decisão, essa ou aquela entidade.

Nas ferramentas utilizadas neste trabalho, os mutantes podem ser mortos por quatro razões (Delamaro et al., 1996):

1. *Stdout*: quando a saída do mutante é diferente do programa original;

2. *RetCode*: quando o código de retorno é diferente do programa original;
3. *Timeout*: quando o tempo de execução do mutante excede o tempo de execução do programa original sendo esse tempo definido por uma constante; e
4. *Trap*: quando a execução atingi alguma “armadilha” (função *trap*)².

Com certeza, um dos principais problemas na aplicação do Teste de Mutação diz respeito à complexidade da execução dos mutantes. Muitas vezes o número de mutantes criados é muito alto, fazendo com que a complexidade computacional da sua execução seja proibitiva.

Outro problema estão nas dificuldades associadas em capturar casos de teste e compará-los às saídas quando o programa em teste utiliza como *input* uma interface gráfica por exemplo. A natureza das aplicações com *GUI* (*Graphical User Interface*), seu modo assíncrono de operação, entrada e saída não tradicionais e a estrutura hierárquica de interação com o usuário tornam o teste significativamente mais complexo em comparação com o teste de software “tradicional”.

2.3.2.4 Análise dos Mutantes Vivos

Essa é a fase do Teste de Mutação que requer mais intervenção humana. Primeiramente, é necessário analisar os mutantes que sobreviveram à execução com os casos de teste disponíveis. O mutante *M* pode ter ficado vivo devido a:

- O conjunto *T* não ser suficiente (adequado) para distinguir o comportamento de *P* e *M* e, nesse caso, podem ser incluídos novos casos de teste no conjunto *T*;
- *M* ser equivalente a *P*. Para qualquer dado do domínio de entrada não existe diferença entre o comportamento dos dois programas. Um exemplo de mutante equivalente é apresentado na Figura 2.3;

<pre>if (signal(SIGINT, SIG_IGN) SIG_IGN) signal(SIGINT, term);</pre>	Programa Original
<pre>if (signal(SIGINT, SIG_IGN) + SIG_IGN) signal(SIGINT, term);</pre>	Mutante

Figura 2.3: Exemplo de Mutante Equivalente.

²Alguns operadores aplicam a mutação incluindo a função *trap* (“trap function”) no programa em teste (operadores “instrumentados”). Os mutantes gerados por esse tipo de operador são mortos quando a função *trap* é executada, ou seja, apenas os mutantes gerados por esse tipo de operador podem ser mortos por *trap*.

- M ser “quase-equivalente” a P , quando M , em certas situações (que as vezes não temos como força-la), não tem o mesmo comportamento que P . Um exemplo de mutante quase-equivalente é apresentado na Figura 2.4. Neste mutante não temos como atribuir um valor diferente de zero a variável local `year` para que o mutante seja morto, o estado da pilha é que vai determinar qual será esse valor, podendo ser zero ou não. Esses mutantes, assim como os equivalentes, devem ser descartados.

<pre>year = 0; . . if (year/12)*360 printf("Invalid Year!");</pre>	Programa Original
<pre>;</pre> <pre>. . if (year/12)*360 printf("Invalid Year!");</pre>	Mutante

Figura 2.4: Exemplo de Mutante Quase-Equivalente.

Terminada a análise dos mutantes vivos e determinados os equivalentes e quase-equivalentes pode-se obter um indicativo da qualidade do conjunto de casos de teste T através do cálculo do escore de mutação. Se o escore obtido for satisfatório o processo termina; caso contrário, podem ser incluídos novos casos de teste no conjunto T a fim de matar os mutantes que ficaram vivos. Dessa maneira, é necessário retornar ao segundo passo do critério, executar P com os novos casos de teste, executar os mutantes, recalcular o escore de mutação e assim por diante até que se consiga um bom conjunto T .

É preciso ressaltar que, em geral, a equivalência entre programas é uma questão indecidível. Alguns métodos e heurísticas têm sido propostos para determinar a equivalência entre programas (Offutt & Craft, 1994; Offutt & Pan, 1997; Harman et al., 2000).

2.3.3 Teste de Integração

O teste de integração é uma atividade sistemática para a construção da estrutura de programa, realizando-se, ao mesmo tempo, testes para descobrir erros associados as interfaces. O objetivo deste teste é, a partir dos módulos testados no nível de unidade, construir a estrutura de programa que foi determinada pelo projeto (Pressman, 2000).

Nas seções 2.3.3.1 e 2.3.3.2 são apresentados, respectivamente, os tipos de falhas que caracterizam erros de integração e alguns trabalhos relacionados ao teste de integração. O critério Mutaço de Interface proposto por Delamaro (Delamaro, 1997; Delamaro & Maldonado, 1997a, 1999) descrito na Seo 2.3.3.3.

2.3.3.1 Erros de Integrao

Segundo Haley & Zweben (1984), os erros de integrao podem ser classificados em erros de integrao computacional³ e erros de domnio⁴. Dada uma funo F que chama G , o primeiro ocorre quando um erro computacional em G produz um valor incorreto que passado para F que, por sua vez, produz uma sada incorreta. O segundo ocorre quando um erro de domnio em G causa uma sada incorreta em F . Em ambos os casos existem algum valor incorreto passado entre as unidades que os levam a produzir uma sada incorreta.

Considerando esses aspectos, Delamaro (1997) classificou os erros de integrao em trs categorias.

Suponha-se um programa P e um caso de teste t para P . Suponha que em P existam funes F e G tal que F chama G . Define-se $SI(G)$ como o conjunto de valores passados para G e $SO(G)$ os valores retornados por G . Ao executar P com o caso de teste t , identifica-se uma falha causada por um erro de integrao das unidades F e G em uma das seguintes situaes (Delamaro, 1997):

- **Tipo 1** (Figura 2.5 (a)): os valores contidos em $SI(G)$ no so os esperados por G , influenciando a produo de sadas erradas antes do retorno de G . Esse tipo de erro ocorre, por exemplo, quando uma funo chamada com parmetros incorretos ou um flag global possui um valor incorreto, fazendo com que a funo chamada produza uma sada incorreta;
- **Tipo 2** (Figura 2.5 (b)): os valores contidos em $SI(G)$ no so os esperados por G , desse modo, $SO(G)$ assume algum valor incorreto levando a uma sada incorreta (uma falha) aps o retorno de G . Um erro desse tipo pode ocorrer, por exemplo, quando um parmetro incorreto passado para a funo for utilizado para calcular o valor de retorno. Uma entrada incorreta pode levar a um valor de retorno incorreto que, por sua vez, pode gerar uma sada incorreta; e
- **Tipo 3** (Figura 2.5 (c)): os valores contidos em $SI(G)$ so os esperados por G , mas valores incorretos em $SO(G)$ so produzidos dentro de G e esses valores influenciam sadas

³Um erro computacional ocorre quando o caminho correto executado mas o valor computado incorreto (Howden, 1978).

⁴Um erro de domnio ocorre quando um caminho incorreto executado (Howden, 1978).

erradas após o retorno de G . Esse tipo de erro pode ocorrer se uma função é chamada com todos os parâmetros corretos, mas internamente ela realiza um cálculo incorreto produzindo um valor de retorno incorreto e, posteriormente, uma saída incorreta.

A Figura 2.5 esquematiza esses três tipos de falhas que caracterizam os erros de integração (Delamaro, 1997).

Figura 2.5: Modelo de Falhas causadas por Erros de Integração: (A) Tipo 1; (B) Tipo 2; e (C) Tipo 3.

Percebe-se que esta classificação dos tipos de erro é abrangente e não especifica o local do defeito que causa a falha. Ela simplesmente considera a existência de um valor incorreto entrando ou saindo de uma função chamada. Isso exclui, por exemplo, o caso em que $SI(G)$ tem os valores esperados, mas um erro dentro de G produz uma saída incorreta antes do retorno de G . Neste caso, não existe nenhuma propagação de erro através da conexão $F - G$.

Mais de um erro de integração podem estar associados a (ou serem causados por) um defeito simples. Por exemplo, considere um programa com três unidades R , S e T tal que R chama S e, em seguida, R chama T . Suponha que na unidade S um valor incorreto x é retornado ($SO(S)$) e esse valor é parte de $SI(T)$. Suponha que devido a x , T produz uma saída incorreta. Desse modo, um defeito em S produziu um erro Tipo 3 na conexão $R - S$ e um erro Tipo 1 na conexão $R - T$.

Os conjuntos $SI(G)$ e $SO(G)$ dependem, em parte, da linguagem de programação na qual o programa é escrito. Por exemplo, para programas escritos na linguagem C, eles podem ser definidos como:

- $SI(G)$: parâmetros formais de entrada da função G e variáveis globais usadas em G .
- $SO(G)$: parâmetros formais de saída da função G , variáveis globais definidas em G e valores retornados por G através de comandos *return*.

A seguir são apresentados alguns trabalhos com o objetivo de estender os critérios estruturais para o teste de integração com ênfase no Teste de Mutação.

2.3.3.2 Critérios para o Teste em Nível de Integração

Alguns trabalhos foram desenvolvidos com o objetivo de estender os critérios estruturais para o teste de integração. Haley & Zweben (1984) definiram um critério para a avaliação da adequação interprocedural baseado na cobertura de conjuntos de caminhos específicos cuja cardinalidade é determinada somente pela complexidade da interface da função, ao invés da complexidade do caminho.

Linnenkugel & Müllerburg (1990) estenderam alguns critérios de fluxo de dados e de fluxo de controle de modo que estes pudessem ser aplicados no teste de integração. Harrold & Soffa (1991) apresentaram uma técnica para determinar estruturas definições-usos de interface permitindo a aplicação dos critérios de adequação de fluxo de dados (Frankl & Weyuker, 1988) em nível de integração.

Jin & Offut (1995), baseados na classificação de acoplamento de unidades, estabeleceram um critério para o teste de integração. Conforme o tipo de acoplamento existente entre duas unidades, o critério tenta identificar alguns caminhos críticos que deveriam ser cobertos para exercitar adequadamente a conexão.

Vilela et al. (1999) apresentaram um conjunto de critérios, como uma extensão do critério Potenciais-usos (Maldonado, 1991), permitindo a aplicação destes no teste de integração. Esse critério foi denominado Critério Potenciais-usos de Integração.

Visando a estender a aplicação do Teste de Mutação para o teste de integração, Delamaro e Maldonado (Delamaro, 1997; Delamaro et al., 2001) propuseram o critério Mutação de Interface. Este critério baseia-se na idéia de mutações e procura selecionar conjuntos de casos de teste que exercitem as interações entre as unidades através da introdução de erros no programa de modo que as conexões entre as unidades sejam perturbadas. Na seção seguinte é discutido mais detalhadamente o critério Mutação de Interface.

2.3.3.3 O critério Mutação de Interface

O Teste de Mutação em nível de unidade gera sempre o mesmo conjunto de mutantes independente de como as unidades interagem entre si para compor o programa. Em resumo, o Teste de Mutação em nível de unidade tem-se mostrado um critério efetivo para o teste da estrutura interna da unidade, mas não necessariamente para exercitar as interações entre unidades em um programa integrado (Delamaro et al., 2001).

Ao contrário do teste de unidade, o teste de integração preocupa-se em assegurar que as interações entre unidades sejam testadas. O objetivo do critério Mutação de Interface é inserir perturbações nas conexões entre duas unidades, de modo que, para obter um conjunto de casos de teste adequado, o testador deve criar casos de teste que exercitem essas conexões. Utilizando o mesmo raciocínio aplicado à Análise de Mutantes, casos de teste capazes de distinguir

mutantes de interface também devem ser capazes de revelar grande parte dos erros de integração. Essa afirmação depende, evidentemente, de quais mutantes são utilizados ou, em outras palavras, quais operadores de mutação são aplicados (Delamaro & Maldonado, 1997b).

Os operadores de mutação para o teste de unidade possuem semelhanças e diferenças em relação aos operadores de mutação de interface. A idéia básica de ambos é a mesma, ou seja, introduzir modificações sintáticas no programa em teste transformando-o em programas mutantes. Porém, os operadores de mutação de interface estão sempre relacionados a uma conexão. Considere um programa que possua uma unidade F que faça duas chamadas a uma unidade G como mostra a Figura 2.6. Os operadores de mutação de interface irão gerar dois conjuntos de mutantes, um para cada ponto de chamada de G dentro de F e os mutantes de determinado conjunto só podem ser distinguidos se forem executados a partir do ponto de chamada para o qual foram criados, pois do contrário não se estaria testando a conexão desejada (Delamaro, 1997).

Figura 2.6: Representação do Conjunto de Mutantes Requeridos no Teste da Conexão $F - G$.

O exemplo acima aponta uma diferença sutil entre o teste de unidade, utilizando a Análise de Mutantes, e o teste de integração com a Mutação de Interface. Essa diferença pode ser formalizada através da análise das condições de necessidade e suficiência para um caso de teste distinguir um mutante de unidade. Segundo DeMillo & Offutt (1991), para um caso de teste t distinguir um mutante M gerado a partir de um programa P , três condições são requeridas:

1. Alcançabilidade (*Reachability*): a execução de M com o caso de teste t deve fazer com que o controle do programa alcance o ponto onde a mutação foi realizada;
2. Necessidade (*Necessity*): o estado de M difere do estado de P logo após a execução do comando modificado (mutado); e
3. Suficiência (*Sufficiency*): a diferença nos estados de P e M deve propagar-se tal que diferentes saídas sejam produzidas por P e M .

Na conexão $F - G$ representado pela Figura 2.6, considere que determinado operador op é aplicado a um único ponto no interior da função G produzindo uma função mutante G' . Com isso, visto que existem duas chamadas à função G pela função F , dois mutantes devem ser gerados, o primeiro é aquele no qual a primeira chamada de G é substituída por G' (Figura 2.7 (a)) e o segundo é aquele em que a segunda chamada é substituída (Figura 2.7 (b)).

Assim, uma mutação aplicada dentro da função chamada só deve ser efetivamente habilitada se a função foi chamada do ponto cuja conexão deseja-se testar. No exemplo da Figura 2.7, ao se executar o mutante (a) deve-se assegurar que a primeira chamada à função G seja substituída pela função mutante G' , entretanto, a segunda chamada a função G deve permanecer inalterada de modo que o mutante (a) só poderá ser distinguido através da primeira chamada à G . Com isso pode-se exercitar de maneira mais completa a conexão que, na verdade, é composta por mais de uma chamada de função.

F()	F()
{	{
...	...
G'();	G();
...	...
...	...
G();	G'();
...	...
}	}
(a)	(b)

Figura 2.7: Mutantes Associados às Chamadas de G e F .

Os operadores de mutação definidos por Delamaro (1997) para o teste de integração, são divididos em dois grupos. Considerando a conexão $F - G$ da Figura 2.8, o primeiro grupo (Grupo-I) aplica mutações dentro do corpo da função G . Esse grupo requer a preparação da mutação no ponto onde F chama G tal que a mutação é aplicada somente se a função G é chamada através desse ponto, caso contrário, a função G se comporta como no programa original. O segundo grupo de operadores (Grupo-II) é aplicado nos pontos onde a função F faz chamadas a G .

Figura 2.8: Conexão entre as unidades F e G .

Segundo Delamaro (1997), o conjunto de operadores proposto é experimental e foi criado com base, principalmente, na experiência no uso do Teste de Mutação. Além disso, o conjunto proposto busca ser completo, no sentido de exercitar a maioria das interações entre duas unidades mas, por outro lado, tenta também ser restrito, no sentido de que as mutações sejam restritas aos pontos essenciais ao teste de integração, mantendo baixo o custo de aplicação do critério. Entretanto, conforme ressalta o próprio autor, analisando-se a complexidade dos operadores definidos, pode-se esperar que a quantidade de mutantes gerados pelo critério Mutação de Interface seja bastante alta, mesmo para o teste de uma conexão formada por duas unidades simples. Mais detalhes sobre o critério Mutação de Interface e seus operadores de mutação, podem ser encontrados em (Delamaro et al., 2001).

2.4 Ferramentas para o Teste de Mutação

Com a crescente complexidade do software, qualquer estratégia de teste sem suporte de ferramentas tende a ser trabalhosa e propensa a erros. Para a aplicação efetiva de um critério de teste faz-se necessário o uso de ferramentas automatizadas que apoiem tal critério pois, do contrário, sua aplicação será limitada a programas muito simples (Horgan & Mathur, 1992).

A disponibilidade de ferramentas de teste permite a transferência de tecnologia para as indústrias e contribui para uma contínua evolução de tais ambientes, fatores indispensáveis para a produção de software de alta qualidade. Além disso, tais ferramentas auxiliam pesquisadores e alunos de Engenharia de Software a adquirir os conceitos básicos e experiência na comparação, seleção e estabelecimento de estratégias de teste (Vincenzi, 1998).

As ferramentas de teste visam a reduzir a intervenção humana durante a atividade de teste, aumentando a qualidade e a produtividade dessa atividade e influenciando de maneira direta na confiabilidade do software testado. Os casos de teste utilizados durante a atividade de teste podem ser facilmente obtidos para revalidação do software após uma modificação. Pode-se, com isso, checar se a funcionalidade do software foi alterada, reduzir o custo para gerar os testes de regressão e comparar os resultados obtidos nos testes de regressão com os resultados do teste original (Souza, 1996).

Na tentativa de automatizar a atividade de teste várias ferramentas de apoio aos critérios existentes têm sido desenvolvidas. Em relação ao Teste de Mutação, a primeira ferramenta construída para apoiar o critério Análise de Mutantes foi o *FMS.1* (*Fortran Mutation System - Versão 1*) desenvolvida na *Yale University* em 1979. *FMS.1* tratava somente de um subconjunto do *Fortran*, ou seja, programas compostos apenas de uma única subrotina com aritmética de inteiros e sem comandos de entrada e saída. O sucesso desse projeto foi suficiente para motivar a construção de outros sistemas mais elaborados. Com o *FMS.2*, também desenvolvido na *Yale*

University e depois no *Georgia Institute of Technology*, já era possível testar programas com várias subrotinas em ANSI *Fortran*, exceto comandos de entrada e saída (Acree et al., 1979).

Budd (1981) desenvolveu na *Yale University* um sistema de mutação para programas *Fortran* - *EXPER* (Experimental Mutation System) - baseado na mesma idéia dos sistemas acima (Budd, 1981).

Novas ferramentas vêm sendo propostas e estudadas a fim de suprir as deficiências encontradas nas anteriores. Entre elas destacam-se a *Mothra* (DeMillo et al., 1988), a *Proteum* (Delamaro, 1993; Delamaro & Maldonado, 1993) e a *PROTEUM/IM* (Delamaro, 1997; Delamaro & Maldonado, 1999).

A *Mothra* é um ambiente de teste que apóia o critério Análise de Mutantes para programas na linguagem *Fortran-77*, apresentando 22 operadores de mutação. A ferramenta foi desenvolvida pela *Purdue University* e *Georgia Institute of Technology* (DeMillo et al., 1988; Choi et al., 1989) e possui interfaces baseadas em menus ou janelas, facilitando a visualização das informações. Atualmente, a *Mothra* possui acoplada a si a ferramenta *Godzilla*, capaz de gerar automaticamente casos de teste muito próximos da adequação utilizando para isso um esquema chamado geração automática de casos de teste baseado em restrições (*constraint-based automatic test data generation*) (DeMillo & Offutt, 1991) e a ferramenta *Equalizer*, capaz de determinar parte dos mutantes equivalentes (Offutt & Craft, 1994).

As ferramentas *Proteum* (*Program Testing Using Mutants*) (Delamaro, 1993; Delamaro & Maldonado, 1993) e *PROTEUM/IM* (Delamaro, 1997; Delamaro & Maldonado, 1999) foram desenvolvidas no Instituto de Ciências Matemáticas de São Carlos - USP, e apóiam a aplicação do critério Análise de Mutantes e Mutação de Interface, respectivamente. Atualmente essas ferramentas estão integradas em um único ambiente denominado *PROTEUM/IM 2.0* (Delamaro et al., 2000). Ambas as ferramentas são ambientes compilados e possuem interfaces baseadas em janelas e *scripts*. Não possuem gerador automático de casos de teste e a determinação de equivalência entre mutantes é feita manualmente.

2.5 Estudos Empíricos

A realização de estudos empíricos permite comparar os diversos critérios de teste existentes, procurando fornecer uma estratégia viável para realização dos testes. Os fatores custo, eficácia e dificuldade de satisfação (*strength*) são os fatores básicos para avaliar um critério de teste, sendo que o custo refere-se ao esforço necessário para que o critério seja usado; a eficácia refere-se à capacidade que um critério possui em detectar erros, e a dificuldade de satisfação refere-se à probabilidade de satisfazer um critério C_2 tendo satisfeito um critério C_1 (Wong et al., 1994b). Com base nesses fatores comparativos, estudos empíricos e teóricos são conduzidos com o objetivo de encontrar formas econômicas e produtivas para se desenvolver os testes.

Embora estudos empíricos realizados demonstrem a eficácia do Teste de Mutação em revelar a presença de erros (Mathur & Wong, 1993; Offutt et al., 1993; DeMillo et al., 1993; Offutt & Lee, 1994; Wong et al., 1994a,b; Offutt et al., 1996b; Offutt & Craft, 1994; Offutt et al., 1996a; Souza, 1996; Delamaro & Maldonado, 1997b; Offutt & Pan, 1997; Wong et al., 1997; Barbosa, 1998; Vincenzi, 1998; Barbosa et al., 2001; Delamaro et al., 2001; Vincenzi et al., 2001), um problema relacionado a esse critério é seu alto custo. Isso ocorre devido ao grande número de mutantes gerados e o tempo e esforço gasto na determinação dos mutantes equivalentes. A seguir são descritos alguns estudos empíricos que visam reduzir o custo do Teste de Mutação considerando esses aspectos.

2.5.1 Redução do Número de Mutantes Gerados

Barbosa (1998) definiu um procedimento para a determinação de um conjunto essencial de operadores de mutação para a Linguagem C. A aplicação do procedimento *Essencial* fornece subsídios para que a escolha dos operadores de mutação a serem utilizados durante o teste seja feita de modo mais sistemático e criterioso, diminuindo assim o custo de aplicação do critério.

O procedimento *Essencial* foi aplicado a um conjunto de programas C, visando a determinar um conjunto essencial de operadores de mutação para essa linguagem; para isso, foram utilizados os operadores de mutação implementados na ferramenta *Proteum*. De um modo geral, observou-se que o conjunto essencial obtido proporcionou uma redução de custo de 65,9%, preservando alto escore de mutação em relação ao critério Análise de Mutantes. A abordagem proposta também foi comparada com outras duas, a de Offutt et al. (1996a) e a de Wong et al. (1997); os resultados obtidos mostraram que o escore de mutação proporcionado pelo conjunto essencial em relação ao critério Análise de Mutantes foi superior aos escores de mutação proporcionados pelas demais abordagens.

O procedimento *Essencial* foi também aplicado em cinco programas utilitários do UNIX (Cal, Checkeq, Comm, Look, Uniq), para validar o procedimento proposto em outro domínio de aplicação. Barbosa (1998) observou que o conjunto essencial obtido a partir da aplicação do procedimento proporcionou uma redução de custo de cerca de 82% em relação ao critério Análise de Mutantes e, ainda assim, o grau de adequação manteve-se elevado (0,99761). Tais resultados fornecem indícios de que a aplicação do procedimento, mesmo em diferentes domínios, resulta em conjuntos essenciais de operadores altamente efetivos, quer seja quanto ao custo de aplicação (em termos do número de mutantes gerados), ou quanto ao grau de adequação em relação à Análise de Mutantes.

Vincenzi (1998) desenvolveu estudos empíricos envolvendo o critério Mutação de Interface, utilizando os mesmos cinco programas utilitários do UNIX (Cal, Checkeq, Comm, Look, Uniq), utilizados por Barbosa (1998), que possibilitaram analisar as relações existentes entre os

operadores de mutação de interface e estabelecer uma estratégia incremental para a aplicação dos mesmos. Utilizando tal abordagem, foram estabelecidas duas seqüências de aplicação dos operadores de mutação de interface: uma a partir dos operadores de mutação de interface que determinavam o maior escore de mutação em relação aos demais e outra a partir dos operadores do Grupo-II⁵ (operadores que aplicam mutação nos pontos de chamada da função). Ambas as seqüências de operadores produziram conjuntos MI-adequados e possibilitavam redução do custo entre 21,76% e 19,25%. Após essa análise foi aplicado o procedimento *Essencial* (Barbosa, 1998) utilizando operadores de mutação da ferramenta *PROTEUM/IM*, para determinar o conjunto essencial de operadores de Mutação de Interface. A partir desse conjunto essencial, uma nova estratégia incremental de aplicação dos operadores foi estabelecida.

Foi realizada uma comparação das três estratégias incrementais: a partir dos operadores que proporcionam os maiores *scores* de mutação; priorizando os operadores do Grupo-II e a partir do conjunto de operadores essenciais. A estratégia formada a partir do conjunto de operadores essenciais apresentou-se como a que seleciona conjuntos MI-adequados com o menor custo, cerca de 25,96% na redução de custo na geração de mutantes.

Ainda nesse trabalho, Vincenzi (1998) verificou a necessidade de aplicação de ambos os critérios, Análise de Mutantes e Mutação de Interface. Foram avaliadas quais as relações entre os operadores de mutação utilizados em nível de unidade e integração, ou seja, foi avaliada a adequação de conjuntos de casos de teste AM-adequados em relação aos operadores de interface e vice-versa. Vincenzi (1998) mostrou que embora os critérios Análise de Mutante e Mutação de Interface sejam destinados a fases distintas da atividade de teste, esses são complementares, ou seja, devem ser utilizados em conjunto para assegurar um teste de melhor qualidade.

De um modo geral, observou-se que tanto a partir de um conjunto de casos de teste AM-adequado quanto a partir de um conjunto essencial-AM-adequado, a utilização de mais 16 operadores de mutação de interface resulta em um conjunto de casos de teste MI-adequado, com uma redução no custo de aplicação dos critérios Análise de Mutantes e Mutação de Interface entre 16,27% e 42,96%, dependendo se o conjunto MI-adequado foi obtido a partir de um conjunto AM-adequado ou essencial-AM-adequado, respectivamente.

Da mesma forma, um conjunto de casos de teste MI-adequado ou um conjunto de casos de teste essencial-MI-adequado requer que mais 13 operadores de mutação de unidade sejam utilizados até que se obtenha um conjunto de casos de teste AM-adequado. Isso representa uma redução no custo de aplicação do critério Análise de Mutantes de aproximadamente 50% e uma redução no custo total dos critérios Análise de Mutantes e Mutação de Interface entre 23,90% e 62,10% se o conjunto AM-adequado for obtido a partir de um conjunto MI-adequado ou essencial-MI-adequado, respectivamente.

⁵Mais detalhes sobre os operadores de mutação estão no Capítulo 3

Além disso, demonstrou-se que somente a utilização dos conjuntos essenciais de operadores de mutação é suficiente para se construir um conjunto de casos de teste que determine escore de mutação superiores a 0,99 com uma redução no custo total de aplicação dos critérios Análise de Mutantes e Mutação de Interface de aproximadamente 66,59%.

Vincenzi et al. (2001) propuseram estratégias para a aplicação dos operadores de mutação, procurando minimizar o custo de aplicação dos critérios Análise de Mutantes e Mutação de Interface, visando a estabelecer um modo incremental para sua aplicação, reduzindo o custo do teste de unidade e de integração.

Para o estabelecimento dessas estratégias utilizou-se o mesmo conjunto de cinco programas (Cal, Checkeq, Comm, Look, Uniq) utilizado nos estudos anteriores. Essas estratégias foram baseadas na relação entre o escore de mutação e o custo de cada operador em relação ao número de mutantes gerados. Foram estabelecidas seis estratégias:

- *SCUS-Score-Cost Incremental Unit Testing Strategy* e *SUS-Sufficient Incremental Unit Testing Strategy* para o critério Análise de Mutantes;
- *SCIS-Score-Cost Incremental Interface Testing Strategy* e *SIS-Sufficient Incremental Interface Testing Strategy* para o critério Mutação de Interface; e
- *U-IS-Unit-Interface Incremental Testing Strategy* e *SU-IS-Sufficient Unit-Interface Incremental Testing Strategy* para aplicação de ambos os critérios com um menor custo.

Para se estabelecer essas estratégias, Vincenzi et al. (2001) determinaram uma classificação inicial dos operadores de mutação considerando o incremento no escore de mutação que um conjunto de casos de teste adequado para um determinado operador tem sobre o conjunto de todos os outros operadores e o número de mutantes gerados por este operador.

Aplicando-se a estratégia *SCUS* obteve uma redução de custo de 32,34% utilizando-se 31 dos 71 operadores de mutação para se obter um conjunto AM-adequado. Um escore de mutação superior a 0,99 pode ser obtido com apenas 17 operadores, com uma redução de custo de 92,79%. Já para o teste de integração (*SCIS*) foram necessários apenas 23 operadores do 33 para se obter um conjunto MI-adequado obtendo uma redução de custo de 24,37%. Usando-se somente 10 operadores, um escore de mutação superior a 0,99 é obtido com uma redução de custo de 87,16%.

Utilizando-se os conjuntos essenciais de operadores de mutação, Vincenzi et al. (2001) estabeleceram as estratégias *SUS* e *SIS* para o teste de integração e unidade, respectivamente.

SUS obteve um conjunto de casos de teste AM-adequado com uma redução de custo de 40%, o que representa uma melhora de 8% em relação a *SCUS*. Além disso, utilizando-se a estratégia *SUS* um escore de mutação superior a 0,99 é obtido com apenas 5 operadores e uma

redução de custo de 86,98% é obtida. Aplicando-se a estratégia *SIS*, obteve-se uma redução de custo de 25,96% e 87,54% para se chegar a um conjunto de caso de teste MI-adequado e um escore superior a 0,99, respectivamente.

Procurando reduzir o custo de aplicação de ambos os critérios e verificando a necessidade de aplica-los em conjunto, ou seja, tendo-se um conjunto de casos de teste AM-adequado, o quanto esse conjunto satisfaz o critério Mutação de Interface? Procurando responder essa questão, Vincenzi et al. (2001) propuseram duas estratégias, *U-IS-Unit-Interface Incremental Testing Strategy* que aplica os operadores determinados pela aplicação da estratégia *SUS* mais os operadores de interface necessários para se chegar a um conjunto MI-adequado obtendo uma redução de custo de 93,41% para um escore superior a 0,99 e 27,77% para um conjunto MI-adequado, e *SU-IS-Sufficient Unit-Interface Incremental Testing Strategy* que aplica os operadores essenciais para o teste de unidade e para o teste de integração e obteve-se uma redução de custo para aplicação do critério mutação de interface de 73,22% atingindo um escore de mutação de 0,998. Com isso concluiu-se que os critérios Análise de Mutantes e Mutação de Interface são complementares e devem ser aplicados em conjuntos para se obter um teste de melhor qualidade.

2.5.2 Determinação de Mutantes equivalentes

Um estudo realizado por Offutt & Craft (1994), visa à redução do custo de aplicação do critério Análise de Mutantes, identificando alternativas que permitam a determinação automática de mutantes equivalentes. Nesse estudo são apresentadas 6 técnicas baseadas em estratégias de otimização de compiladores e análise de fluxo de dados para determinar mutantes equivalentes⁶. As técnicas são:

- Detecção de Código não Alcançável;
- Propagação de Constantes;
- Propagação de Invariantes;
- Detecção de Sub-expressões Comuns;
- Detecção de Invariantes de Repetição; e
- *Hoisting* e *Sinking*.

Essas técnicas foram implementadas em um módulo da ferramentas de teste *Mothra*, chamado *Equalizer*. O *Equalizer* é implementado em linguagem C e, como a *Mothra*, trabalha com programas em *Fortran 77*.

⁶Detalhes dessas técnicas podem ser encontrados em (Offutt & Craft, 1994).

Para avaliar a aplicação dessas técnicas, foi realizado um experimento envolvendo a ferramenta *Mothra* e uma gama de 15 programas em *Fortran 77*. Esses programas geram de 180 a 3000 mutantes. Cada programa foi analisado manualmente por vários pesquisadores para determinar os mutantes equivalentes diminuindo assim as chances de erros com relação a determinação desses mutantes. O experimento emprega 4 passos (Offutt & Craft, 1994):

1. Para cada programa, cada técnica de detecção do *Equalizer* foi executada separadamente para contar quantos mutantes equivalentes cada técnica detecta.
2. Os mutantes que foram marcados como equivalentes no passo 1 foram revivido e todas as técnicas de detecção foram aplicadas juntas para obter o número total de mutantes equivalentes que o *Equalizer* pode detectar (alguns mutantes equivalentes foram detectados por mais de uma técnica).
3. Os mutantes que foram marcados como equivalentes no passo 2 foram novamente revividos e casos de teste foram gerados usando o gerador automático de dados de teste *Godzilla*, e executado novamente todos os mutantes.
4. Os mutantes que restaram vivos foram analisados manualmente para encontrar o número verdadeiro de mutantes equivalentes.

Os resultados obtidos neste experimento são mostrados na Tabela 2.1. As técnicas de Invariantes de Repetição, *Hoisting* e *Sinking* e Detecção de Sub-expressões Comuns não detectaram nenhum mutante equivalente nesses programas e por isso não estão incluídos na Tabela 2.1. O número de mutantes equivalentes detectado a partir de cada técnica é mostrado para cada programa. A coluna *Total Detectado* mostra o total de mutantes detectados aplicando-se todas as técnicas (passo 2). A coluna *Total Equivalente* mostra o número total de mutantes equivalentes para cada programa (determinado no passo 4). A coluna *Porcentagem Detectada* mostra a porcentagem do total de mutantes equivalente que o *Equalizer* detectou.

A porcentagem média de detecção de mutantes equivalentes foi cerca de 10%, mas a divergência padrão foi bastante alta (25%), ou seja, foram detectados 49% dos mutantes equivalentes para Banker, enquanto nenhum mutante equivalente foi detectado para os programas Bsearch e Cal. Essa diferença é devido aos programas Bsearch e Cal possuírem estruturas arrays, sobre as quais o *Equalizer* não tem um bom controle por tratar como um elemento único, e comandos *goto's*, que não são controlados pela ferramenta *Equalizer*. Já o programa Banker possui boa estrutura de algoritmo, com *loops* no lugar de comandos *goto's*.

As técnicas de Invariantes de Repetição, *Hoisting* e *Sinking* e Detecção de Sub-expressões Comuns dependem de características do programa que são raras. Assim para mostrar a eficiência dessas técnicas, foram criados 3 programas nas quais a aplicação dessas técnicas obtiveram

Tabela 2.1: Detecção de Mutantes Equivalentes - 15 Programas (Offutt & Craft, 1994)

Programas	Tamanho (LOC)	Código não Alcançável	Propagação de Constantes	Propagação de Invariantes	Total Detectado	Total Equivalentes	Porcentagem Detectada
Bsearch	20	0	0	0	0	27	0%
Banker	48	0	1	21	21	43	49%
Bubble	11	0	5	4	5	35	14%
Cal	29	0	0	0	0	263	0%
Count	8	0	1	4	5	19	26%
Dead	8	7	0	0	7	7	100%
Deallook	52	0	0	18	18	196	9%
Euclid	11	0	0	1	1	26	4%
Find	28	0	0	1	1	77	1%
Insert	14	0	0	10	10	48	21%
Max	5	0	1	0	1	4	25%
Mid	16	0	0	1	1	13	8%
Trismall	13	0	0	18	18	99	18%
Trityp	28	0	3	12	12	111	11%
Warsball	11	0	0	4	4	35	11%

sucesso. Os resultados são apresentados na Tabela 2.2. O significado das colunas *Total Detectado*, *Total de Equiv.* e *Porc. Detectada* são os mesmos da Tabela 2.1.

Tabela 2.2: Detecção de Mutantes Equivalentes - 3 Programas (Offutt & Craft, 1994)

Programas	Propag. de Constantes	Propag. de Invariantes	Sub-exp. Comuns	Invar. de Repetição	Hoisting Sinking	Total Detectado	Total Equiv.	Porc. Detectada
TESTCOM	0	0	2	0	0	2	2	100%
TESTLOOP	6	4	0	1	0	7	25	28%
TESTHOIST	0	4	0	0	1	5	13	38%

Tabela 2.3: Mutantes Equivalentes por Operador - *Mothra* (Offutt & Craft, 1994)

Operadores	Número de Equivalentes	Número Detectado	Porcentagem Detectada
ABS	170	100	59%
AOR	2	0	0%
CRP	4	2	50%
CSR	3	1	33%
DER	3	0	0%
GLR	4	0	0%
LCR	6	0	0%
ROR	14	0	0%
RSR	6	1	17%
SAN	1	1	100%
SCR	5	2	40%
SDL	4	1	25%
SVR	12	5	42%
UOI	21	1	5%
Total	255	114	45%

A Tabela 2.3 apresenta a distribuição dos mutantes equivalentes por operador de mutação referentes aos programas da Tabela 2.1. A coluna *Número de Equivalentes*, refere-se ao número total de mutantes equivalentes por operador; as colunas *Número Detectado* e *Porcentagem*

Detectada, mostram respectivamente o número e a porcentagem de mutantes detectados por operador.

Observou-se na Tabela 2.3, que a maioria dos mutantes equivalentes (67%), para esses programas são mutantes gerados a partir do operador ABS (*Absolute Value Insertion*). A condição para matar esse tipo de mutante é que a variável sobre a qual ele age, possua o valor maior ou igual a zero. Por esta razão, as técnicas de *Propagação de Constantes* e *Propagação de Invariantes* detectam mais mutantes equivalentes, devido a elas se preocuparem diretamente com relação a variáveis com valor zero.

Offutt & Craft (1994) chegaram à conclusão que usando técnicas de análises de fluxo de dados e otimização de compiladores, pode-se detectar automaticamente uma porcentagem significativa dos mutantes equivalentes, em alguns casos quase metade, reduzindo assim o custo na detecção de mutantes equivalentes.

Além do custo da determinação de equivalência manualmente ser muito alto, Offutt & Craft (1994) afirmam que as pessoas, ao determinar os mutantes equivalentes sem uma ferramenta automatizada, julgam mutantes equivalentes corretamente em 80% dos casos. Em 12% dos casos, pessoas marcam mutantes equivalentes como não equivalentes e em 8%, mutantes não equivalentes como equivalentes, sendo o segundo fator comprometedor para a atividade de teste. Por isto, a utilização de técnicas automatizadas para determinação de mutantes equivalentes é de extrema importância para garantir a qualidade da atividade de teste, diminuindo assim os erros cometidos pela intervenção humana.

Procurando melhorar os resultados obtidos por Offutt & Craft (1994), no estudo realizado por Offutt & Pan (1997), foram aplicados três estratégias baseadas em restrições matemáticas, originalmente desenvolvida para geração de dados de teste (*CBT - Constraint-Based Testing*), para se determinar mutantes equivalentes e caminhos não alcançáveis. Essas estratégias são:

- Negação;
- Divisão de Restrições; e
- Comparação de Constantes.

Essas estratégias estão implementadas na ferramenta *Equivalencer*, que é integrada ao gerador de dados de teste *Godzilla*, dentro do conjunto de ferramentas de mutação *Mothra*, que hoje substitui a ferramenta desenvolvida por Offutt & Craft (1994) para determinação de mutantes equivalentes (*Equalizer*).

Nesse experimento foram utilizados 11 programas *Fortran 77*, que geram entre 180 a 3000 mutantes, sendo 9 dos 15 utilizados no estudo realizado por Offutt & Craft (1994), como pode ser visto na Tabela 2.4.

O experimento emprega 5 passos:

1. Os mutantes foram analisados manualmente para encontrar o número verdadeiro de mutantes equivalentes;
2. Para cada programa, *Mothra* foi usada para gerar todos os mutantes, e *Godzilla* foi usado para gerar casos de teste (restrições de necessidade e restrições de alcançabilidade⁷);
3. As restrições em relação a especificação foram criadas, por Offutt, para cada programa;
4. *Equivalencer* foi aplicado aos programas para obter a quantidade de mutantes detectados;
5. Os mutantes que foram marcados como equivalentes foram comparados com os marcados manualmente.

A coluna *Equivalentes* mostra o número total de mutantes equivalentes por programa; a coluna *Equivalentes Detectados e Porcentagem Detectada*, mostram, respectivamente, o número e a porcentagem de mutantes equivalente detectados para cada programa.

Tabela 2.4: Detecção de Mutantes Equivalentes - 11 Programas (Offutt & Pan, 1997)

Programas	Tamanho (LOC)	Mutantes	Número de Equivalentes	Equivalentes Detectados	Porcentagem Detectada
Bsearch	20	299	27	19	70,37%
Bub	11	3389	35	24	68,57%
Cal	29	3010	236	37	15,67%
Euclid	11	196	24	18	75%
Find	28	1022	75	63	84%
Insert	14	460	46	32	69,57%
Mid	16	183	13	3	23,08%
Pat	170	513	61	29	47,54%
Quad	10	359	31	4	12,9%
Trityp	28	951	109	80	73,39%
Warshall	11	305	35	22	62,86%
Total	185	7636	695	331	47,63%

Apesar do foco desse estudo seja a determinação de mutantes equivalentes, Offutt & Pan (1997) observaram que podiam ser aplicadas ao problema de detecção de caminhos não alcançáveis. Assim, 9 programas foram construídos artificialmente com alguns caminhos não alcançáveis, e utilizou-se a ferramenta *Equivalencer* para tentar detectá-los. Nos 9 programas da Tabela 2.5, existiam 14 caminhos não alcançáveis e a ferramenta conseguiu detectar 10 deles. Os resultados demonstram uma maior eficácia, das estratégias aplicadas, na detecção de caminhos não alcançáveis (71,43%) do que na determinação de mutantes equivalentes (47,63%).

Embora *Equivalencer* seja capaz de detectar aproximadamente metade dos mutantes equivalentes em média, a porcentagem encontrada para cada programa varia muito. Este fato, também

⁷Detalhes dessas restrições podem ser encontrados em (Offutt & Pan, 1997).

Tabela 2.5: Detecção de Pontos não Executáveis (Offutt & Pan, 1997)

<i>Programas</i>	<i>Caminhos Não (Alcançáveis)</i>	<i>Detectados</i>	<i>Porcentagem Detectada</i>
Prog 1	2	1	50%
Prog 2	1	0	0%
Prog 3	1	1	100%
Prog 4	1	1	100%
Prog 5	1	1	100%
Prog 6	1	1	100%
Prog 7	2	2	100%
Prog 8	3	3	100%
Prog 9	2	0	0%
<i>Total</i>	<i>14</i>	<i>10</i>	<i>71,43%</i>

encontrado no estudo de Offutt & Craft (1994), é devido à restrição da ferramenta no tratamento de estruturas do tipo *arrays*. *Godzilla* trata *arrays* como item de dado único. Por esta razão, algumas restrições que envolvem *arrays* não podem ser usadas para determinar mutantes equivalentes, ou seja, se elementos de um *array* forem tratados individualmente, a técnica baseada em restrições pode ser usada para detectar mais mutantes equivalentes. Segundo Offutt & Pan (1997) esse problema é uma particularidade importante para o programa Cal. Se a técnica de detecção tratar os elementos de um *array* individualmente o *Equivalencer* aumenta de 15,67% para 44,92% a porcentagem de detecção dos mutantes equivalentes no programa Cal. Conclui-se ainda que usando técnicas baseadas em restrições, *Equivalencer* é capaz de detectar automaticamente uma porcentagem significativa para muitos programas, porém ainda não é possível detectar todos os mutantes equivalentes. No experimento a porcentagem de detecção foi acima de 60% para 7 dos 11 programas e a média de porcentagem para todos os programas foi de 47,63% como pode ser visto na Tabela 2.4.

Harman et al. (2000) procuraram aplicar a Análise de Dependência para evitar a geração de mutantes equivalentes e procurar gerar dados de teste para matar os mutantes não equivalentes. Está relação entre Análise de Dependência e o Teste de Mutação é usada para definir um aumento no processo do Teste de Mutação, como mostra a Figura 2.9, adicionando duas fases de Análise de Dependência.

A primeira fase do processo proposto é a criação dos mutantes, que não é influenciada diretamente. A próxima fase consiste na detecção de mutantes equivalentes utilizando-se Análise de Dependência, visto que esta técnica tem um menor custo computacional do que as técnicas baseadas em restrições. Análise de Dependência (JR-Dependência) é melhor aplicada para resolver os problemas relacionados com o Teste de Mutação do que os extensamente utilizados Diagramas de Dependência de Programa. Isto porque JR-Dependência é mais refinado, fornecendo informações não somente dos nós mas também quais variáveis são importantes em um determinado nó. Com isso teremos quais variáveis são importantes para o nó de entrada do programa e quais variáveis devem ser examinadas para evitar a geração de mutantes equivalentes.

A terceira fase seria a aplicação de técnicas baseadas em restrições, estudadas e aplicadas por Offutt & Pan (1997), para gerar casos de teste para matar alguns mutantes e determinar outros como equivalentes.

Os mutantes que permaneceram vivos após as 3 primeiras fases são chamados de “Mutantes Difíceis”. Este deverão ser analisados manualmente, porém o autor propõem a aplicação de mais 2 fases. A primeira fase seria a aplicação do *Amorphous Slicing* (maiores detalhes a respeito em (Hierons et al., 1999)). Esta produz um programa simplificado adequado para a questão do mutante ser equivalente ou não. Com isso pode-se aplicar a técnica JR-Dependência novamente para reduzir o domínio de entrada sobre o qual serão criados os dados de teste. Um conjunto de “Mutantes Difíceis” são finalmente apresentados para uma análise manual sendo que o testador tem uma referência para se criar os casos de teste com a aplicação da técnica JR-Dependência.

Figura 2.9: Processo do Teste de Mutação com Dependência de Associações e Análise de Restrições (Harman et al., 2000).

Os autores concluíram que Análise de Dependência funciona para o testador como uma tecnologia complementar, para ser utilizada em conjunto com técnicas baseadas em restrições para reduzir o número de mutantes equivalentes e para restringir a atenção para um conjunto menor de variáveis de entrada, facilitando a geração de casos de teste.

2.6 Considerações Finais

Este capítulo caracterizou o Teste de Mutação, relatando uma pouco da sua história, os passos para a sua aplicação, os problemas a ele associados e algumas estratégias que procuram solucionar esses problemas de forma a torná-lo aplicável na prática.

Devido a grande eficácia do Teste de Mutação em detectar erros no teste de unidade e à necessidade de se desenvolver novos critérios para o teste de integração, foi apresentado o critério Mutação de Interface proposto por Delamaro e Maldonado (Delamaro, 1997; Delamaro & Maldonado, 1997a, 1999), que aplica o conceito de mutação em nível de interface. Os critérios Análise de Mutantes e Mutação de Interface, assim como os demais critérios de teste, requerem a existência de ferramentas que automatizem suas aplicações. Tais ferramentas, além de

auxiliarem a atividade de teste, são fundamentais para a realização de estudos empíricos responsáveis pela avaliação e comparação entre outros critérios de teste. Algumas dessas ferramentas de apoio ao Teste de Mutação, foram apresentadas neste capítulo. Também foram apresentados alguns estudos empíricos que envolvem a Análise de Mutantes e a Mutação de Interface. Esses estudos visam a reduzir o custo de aplicação dos critérios baseados em mutação diminuindo o número de mutantes gerados ou automatizando, em parte, a determinação de mutantes equivalentes.

No capítulo a seguir é apresentado um experimento com o objetivo de amenizar os problemas encontrados na aplicação do Teste de Mutação, procurando estabelecer heurísticas para determinação de mutantes equivalentes, reduzindo assim o custo relacionado à análise dos mutantes vivos.

Operadores de Mutação: Uma Avaliação Empírica

DE um modo geral, os critérios Análise de Mutantes e Mutação de Interface tem se mostrado, por meio de estudos teóricos e empíricos (Budd et al., 1980; Mathur, 1991; Mathur & Wong, 1993; Wong, 1993; Wong & Mathur, 1995a,b; Offutt et al., 1996a,b; Barbosa, 1998; Vincenzi, 1998; Delamaro et al., 2001), serem eficazes em revelar a presença de erros. Porém, observou-se que ambos os critérios apresentam problemas com relação ao custo de aplicação, dificultando a utilização prática dos mesmos. Com isto, a utilização de alternativas, tais como determinação automática de equivalência entre mutantes e a não geração de mutantes que morrem facilmente mostra-se como uma boa alternativa para reduzir os custos de aplicação desses critérios.

A condução de estudos empíricos envolve o levantamento de uma série de requisitos que possibilitam avaliar a viabilidade e a disponibilidade de recursos para a realização dos mesmos. Com base nesses requisitos é elaborado um *framework* que organiza a condução dos experimentos a serem realizados. Além disso, quando a quantidade de informações a ser coletada é relativamente grande, organizar a condução dos experimentos em etapas facilita o entendimento dos mesmos e contribui para a coleta e análise dos dados.

Neste capítulo são descritos alguns estudos empíricos e analíticos envolvendo o critério Análise de Mutantes e Mutação de Interface os quais possibilitam avaliar quais operadores de mutação geram grande número de mutantes equivalentes fornecendo subsídios para determina-

ção de padrões de equivalência e *guidelines* para auxiliar o testador na atividade de análise dos mutantes vivos, contribuindo para a redução do custo do Teste de Mutação.

Em uma segunda etapa, descrita no Capítulo 4, os operadores de mutação são empiricamente avaliados visando a selecionar um subconjunto de operadores que atinjam um escore de mutação 1.00 para ambos os critérios com um menor custo. Para tanto, estratégias incrementais para aplicação dos operadores de mutação, baseadas nos operadores que geram mutantes difíceis de serem mortos e poucos mutantes equivalentes, foram desenvolvidas visando a reduzir o custo de aplicação.

3.1 Descrição dos Operadores de Mutação

Conforme mencionado anteriormente na Seção 2.3.2.1, os operadores de mutação definem alterações sintáticas a serem realizadas num programa P , com base nas quais são criados seus mutantes. Em um nível de abstração mais alto é possível estabelecerem-se operadores de mutação de maneira genérica e que modelem tipos de defeitos comuns para qualquer linguagem de programação, ou pelo menos, para linguagens de programação com características semelhantes. Por outro lado, é necessário que os operadores levem em conta particularidades de uma determinada linguagem para a qual foram projetados. Nesse caso os operadores de mutação são dependentes da linguagem de programação para a qual são projetados.

A definição de operadores de mutação é fundamental para aplicação de critérios baseados em mutação. São esses operadores que caracterizam o critério, estabelecendo os requisitos de teste, os mutantes, a serem satisfeitos. Um ponto importante a ser investigado é qual a quantidade de operadores de mutação que deve ser definida considerando-se determinada linguagem. Se for definido um conjunto muito restrito, embora um número menor de mutantes seja gerado, um conjunto de casos de teste capaz de distinguir esses mutantes pode não ser efetivo em revelar uma série de erros não modelados pelos operadores. Por outro lado, se um conjunto abrangente de operadores é definido, o número de mutantes gerados tende a ser muito grande o que torna inviável a aplicação do critério. Em geral, o desenvolvimento do conjunto de operadores de mutação está relacionado com um modelo de erros típicos que podem ser cometidos no contexto de dada linguagem e dada fase de teste. Assim sendo, busca-se a definição de um conjunto de operadores de mutação grande suficiente para modelar os erros típicos e, com base em estudos teóricos e empíricos, busca-se avaliar os aspectos de custo, *strength*¹ e eficácia de cada um desses operadores de modo que estratégias de teste de menor custo e alta eficácia possam ser definidas.

¹Considerando o teste de mutação, cada operador pode ser visto como um critério de teste, o *strength* relativo de um operador op_1 é dado pelo escore de mutação, em relação ao conjunto total de mutantes, de um conjunto de teste adequado a op_1 .

Mais detalhes sobre os operadores de mutação implementados nas ferramentas *Proteum* e *PROTEUM/IM* são apresentados a seguir.

3.1.1 Teste de Unidade - *Proteum*

Para o teste de unidade, operadores de mutação buscam modelar os defeitos simples mais comuns para uma determinada linguagem. Por exemplo, trocando-se um operador relacional por outros operadores relacionais força-se a escolha de casos de teste nos limites das condições de decisão do programa. Existem também os operadores chamados “instrumentados” (Agrawal et al., 1989), os quais não modelam defeitos comuns mas procuram assegurar aos casos de teste características mínimas desejadas. Um exemplo, é o operador STRP que troca cada comando, um de cada vez, pela chamada de uma função TRAP (), cuja execução faz com que o mutante seja automaticamente distinguido. Casos de teste que distingam todos mutantes instrumentados dessa forma fazem também com que cada comando da função original seja executado pelo menos uma vez.

Ao todo, 71 operadores foram definidos e classificados em quatro grupos:

1. Mutações de Constantes (3 operadores);
2. Mutações de Comandos (15 operadores);
3. Mutações de Operadores (46 operadores); e
4. Mutações de Variáveis (7 operadores).

Cada grupo de operadores modela diferentes tipos de erros em um mesmo tipo de estrutura, e seus nomes são compostos por quatro letras; a primeira (sempre em letra maiúscula) indica qual a classe do operador: **S** (*statement*), **O** (*operator*), **V** (*variable*) ou **C** (*constant*). As outras letras fazem parte da descrição do operador como no caso do operador CCCR - C onstant for C onstant R eplacement.

Mutações de Constantes

O grupo mutação de constantes modela erros relacionados ao uso incorreto de constantes. Na Tabela 3.1 é descrita a função de cada um desses operadores. Esses operadores são divididos em subcategorias de acordo com os erros que eles modelam, neste sentido, são similares a operadores que substituem variáveis escalares. A Figura 3.1 mostra as subcategorias de operadores de mutação desse grupo.

Tabela 3.1: Operadores de Mutaço de Constantes

Operador	Descrição
Cccr	Troca constantes por todas constantes do programa.
Ccsr	Troca referências escalares por constantes.
CRCR	Troca constantes por: 0,1, -1, dependendo do tipo de referência.

Figura 3.1: Classificação dos Operadores de Mutaço de Constantes

Mutaço de Comandos

Os operadores desse grupo modelam erros relacionados aos comandos do programa em teste, comandos de seleção (if, switch), repetição (while, do-while) e desvio (break, goto). A mutação também pode ser aplicar a um bloco de comandos. Cada um dos operadores pertencentes a este grupo é descrito na Tabela 3.2 e a Figura 3.2 mostra as subcategorias que eles estão classificados.

Tabela 3.2: Operadores de Mutaço de Comandos

Operador	Descrição
SBRC	Substitui break por continue quando possível.
SBRn	Troca o comando continue ou break por uma função break_out_to_level_n(J) sendo que J varia de acordo com o número de laços aninhados. Essa função força a interrupção dos J laços externos.
SCRB	Troca do comando continue por break.
SCRn	Troca o comando continue ou break por uma função continue_out_to_level_n(J) sendo que J varia de acordo com o número de laços aninhados. Essa função força a transferência do programa para o final de J laços acima.
SDWD	Troca o comando do-while por while.
SGLR	Troca os comandos goto 1 por todos os rótulos existentes na função.
SMTc	Interrompe a execução do laço após 2 execuções.
SMTT	Força a execução dos laços mais de uma vez.
SMVB	Move "j" para cima e para baixo, quando possível.
SRSR	Troca cada comando por todos os returns que existem na função em teste.
SSDL	Retira um comando de cada vez do programa.
SSWM	Força a execução de todos os casos do comando switch.
STRl	Força a execução para true e false em cada if.
STRP	Força a execução de todos os comandos do programa.
SWDD	Troca o comando while por do-while.

Mutaço de Operadores

A linguagem C provê uma variedade de operadores para uso em diferentes contextos. Para o propósito de definição de operadores de mutação, os operadores em C são classificados como

Figura 3.2: Classificação dos Operadores de Mutação de Comandos

mostra a Tabela 3.3. Esta tabela lista o conjunto de operadores em *C* usados posteriormente como o domínio e alcance de diferentes operadores de mutação. A coluna “Código” mostra as letras usadas para compor o nome de um operador de mutação. Os operadores desse grupo são projetados para modelar erros no uso de operadores na linguagem *C* como são descritos na Tabela 3.4 e são subdivididos de acordo com seu objetivo como mostra a Figura 3.3.

Tabela 3.3: Classificação dos Operadores Binários em *C*

<i>Tipo</i>	<i>Categoria</i>	<i>Operadores</i>	<i>Código</i>
Sem Atribuição	Aritmética	+ - * / %	A
	Bitwise	& ^	B
	Lógico	&&	L
	Deslocamento	<< >>	S
	Relacional	< > <= >= == !=	R
Com Atribuição	Aritmética	*= /= %= += -=	A
	Bitwise	&= ^= =	B
	Plano	=	E
	Deslocamento	<<= >>=	S

O projeto de mutação de operadores foi encaminhado pelos seguintes fatores (Agrawal et al., 1989):

- Em *C*, operadores correspondem a uma categoria que pode ser usada em uma variedade de contextos. Por exemplo, não existe entidade tal como uma expressão aritmética dentro o qual somente os operadores aritméticos podem ser usados. Assim, dentro de uma expressão que calcula valores aritméticos, um poderá ser usado como operadores lógicos. Por exemplo, para dois inteiros a e b , ambos $a + b$ e $a \&\& b$ são válidos para expressões que calculam inteiros²; e

²Note que isto não é verdadeiro para outras linguagens como o Pascal.

Tabela 3.4: Operadores de Mutaço de Operadores

Operador	Descrição
OAAA	Troca atribuição aritmética por outra atribuição aritmética.
OAAN	Troca operador aritmético por outro aritmético.
OABA	Troca atribuição aritmética por operador de atribuição <i>bitwise</i> .
OABN	Troca operador aritmético por operador <i>bitwise</i> .
OAEA	Troca atribuição aritmética por operador de atribuição plana.
OALN	Troca operador aritmético por operador lógico.
OARN	Troca operador aritmético por operador relacional.
OASA	Troca atribuição aritmética por operador atribuição de deslocamento.
OASN	Troca operador aritmético por operador de deslocamento.
OBAA	Troca atribuição <i>bitwise</i> por atribuição aritmética.
OBAN	Troca operador <i>bitwise</i> por operador aritmético.
OBBA	Troca atribuição <i>bitwise</i> por atribuição <i>bitwise</i> .
OBBN	Troca operador <i>bitwise</i> por operador <i>bitwise</i> .
OBEA	Troca atribuição <i>bitwise</i> por atribuição plana.
OBLN	Troca operador <i>bitwise</i> por operador lógico.
OBNG	Insere negação no operador <i>bitwise</i> .
OBRN	Troca operador <i>bitwise</i> por operador relacional.
OBSA	Troca atribuição <i>bitwise</i> por operador de atribuição de deslocamento.
OBSN	Troca operador <i>bitwise</i> por operador de deslocamento.
OCNG	Insere negação lógica.
OCOR	Troca o tipo primitivo do operador cast.
OFAA	Troca atribuição plana por atribuição aritmética.
OFBA	Troca atribuição plana por atribuição <i>bitwise</i> .
OFSA	Troca atribuição plana por operador de atribuição de deslocamento.
Oido	Troca operador de incremento/decremento.
OIPM	Substitui os operadores de incremento/decremento que não possuem direção.
OLAN	Troca operador lógico por operador aritmético.
OLBN	Troca operador lógico por operador <i>bitwise</i> .
OLLN	Troca operador lógico por outro operador lógico.
OLNG	Insere negação lógica em condições compostas.
OLRN	Troca operador lógico por operador relacional.
OLSN	Troca operador lógico por operador de deslocamento.
ORAN	Troca operador relacional por operador aritmético.
ORBN	Troca operador relacional por operador <i>bitwise</i> .
ORLN	Troca operador relacional por operador lógico.
�RRN	Troca operador relacional por outro relacional.
ORSN	Troca operador relacional por operador de deslocamento.
OSAA	Troca atribuição de deslocamento por atribuição aritmética.
OSAN	Troca operador de deslocamento por operador aritmético.
OSBA	Troca atribuição de deslocamento por atribuição <i>bitwise</i> .
OSBN	Troca operador de deslocamento por operador <i>bitwise</i> .
OSEA	Troca atribuição de deslocamento por atribuição plana.
OSLN	Troca operador de deslocamento por operador lógico.
OSRN	Troca operador de deslocamento por operador relacional.
OSSA	Troca atribuição de deslocamento por outra de deslocam.
OSSN	Troca operador de deslocamento por outro de deslocam.

- Existem dois problemas para se definir um operador de mutao em relao a mutao de operadores: 1) um grande nmero de mutantes ser gerado sempre que tal operador de mutao habilitado e 2) o usurio no ter a flexibilidade para selecionar esses operadores. Procurando solucionar esses problemas, os operadores de mutao para *C* so classificados de modo que o usurio tenha a mxima flexibilidade na sua seleo.

Mutao de Variveis

O uso incorreto de identificadores pode geralmente induzir erros no programa que permanecem desapercibidos por muito tempo. Operadores de mutao de variveis so projetados para

Figura 3.3: Classificao dos Operadores de Mutao de Operadores

modelar esses erros. A Tabela 3.5 descreve a funo de cada operador de mutao de varivel que tm tambm so classificados de acordo com suas funes como mostra a Figura 3.4. Essa classificao assegura que mutantes sintaticamente corretos so gerados, aplicando-se mutaes apenas entre variveis de tipos compatveis.

Tabela 3.5: Operadores de Mutao de Variveis

Operador	Descrição
Varr	Substitui as referências a vetores por variáveis escalares, globais e locais do programa.
VDTR	Força cada referência escalar possuir cada um dos valores: negativo, positivo e zero.
Vprr	Substitui as referências a apontadores por variáveis escalares, globais e locais do programa.
VSCR	Troca as referências a componentes de uma estrutura por demais componentes da mesma estrutura.
Vsrr	Substitui as referências escalares por variáveis escalares, globais e locais do programa.
Vtrr	Substitui as referências a estruturas e uniões por variáveis escalares, globais e locais do programa.
VTWD	Substitui referência escalar pelo seu valor sucessor e antecessor.

Figura 3.4: Classificação dos Operadores de Mutação de Variáveis

3.1.2 Teste de Integração - *PROTEUM/IM*

Operadores de Mutação de Interface possuem semelhanças e diferenças com relação aos operadores de unidade. A idéia por trás de ambos é a mesma, produzir pequenas alterações no programa original e o programa mutante. Por outro lado, operadores de Mutação de Interface são relacionados a uma conexão entre duas unidades, basicamente definidas por regras de chamada de função e passagem de parâmetros, ou seja, cada mutante é relacionado com uma chamada de função como é descrito na Seção 2.3.3.3.

Um ponto essencial ao se pensar no Teste de Mutação é o custo do teste em termos do número de mutantes a serem gerados. É preciso que o número de mutantes seja mantido baixo para que o teste possa ser executado num período de tempo razoável. Os operadores desenvolvidos por Delamaro (1997) buscam esse objetivo por meio da restrição dos pontos do programa onde são aplicados. Somente pontos relacionados com as conexões sendo testadas são sujeitos à aplicação dos operadores. Ao todo, 33 operadores foram definidos e estes estão divididos em dois grupos:

1. Grupo I - Mutações efetuadas no corpo da função chamada (24 operadores); e
2. Grupo II - Mutações efetuadas no ponto de chamada da função (9 operadores).

Os nomes dos operadores de mutação para o teste de interface também são formados por um conjunto de siglas, como os operadores de mutação para o teste de unidade, que são descritas na Tabela 3.6.

Um exemplo de operador de mutação para o teste de integração é o ArgAriNeg - Inserts Arithmetic Negation at Arguments.

Grupo I - Mutações Efetuadas na Função Chamada

Esses operadores aplicam mutações dentro do corpo da função chamada. Eles “perturbam” valores que entram e/ou saem da função. Para esses operadores faz-se necessário um mecanismo

Tabela 3.6: Siglas que Formam os Nomes dos Operadores de Mutação para o Teste de Interface

Sigla	Descrição
All	Todos os elementos da função.
Arg (<i>Argument</i>)	Argumento da função.
Ari (<i>Arithmetic</i>)	Operador aritmético.
Bit	Operação <i>bit</i> a <i>bit</i> .
Cal (<i>Call</i>)	Chamada de função.
Cov (<i>Coverage</i>)	Procura garantir um determinada cobertura sobre o programa.
Dec (<i>Decrement</i>)	Decrementa uma variável (--).
Del (<i>Delete</i>)	Remove determinado comando, argumento, ...
Dir (<i>Direct</i>)	Alteração direta de variáveis de interface.
Edg (<i>Edge</i>)	Desvios existentes na função.
Ext (<i>External</i>)	Uso de variável global, não utilizada no corpo da função.
Fun (<i>Function</i>)	Função a que se refere.
Glo (<i>Global</i>)	Variável global.
Inc (<i>Increase</i>)	Incrementa uma variável (++).
Ind (<i>Indirect</i>)	Alteração indireta, através da mutação de variáveis não de interface.
Loc (<i>Local</i>)	Variável local.
Log (<i>Logical</i>)	Operador lógico (&& e).
Neg (<i>Negation</i>)	Negação de variável (!, ~ e -).
Node (<i>Nodes</i>)	Nós existentes na função.
Par (<i>Parameters</i>)	Parâmetro formal.
Req (<i>Require</i>)	Constante requerida.
Rep (<i>Replace</i>)	Substituições de variáveis e comandos.
Ret (<i>Return</i>)	Comando de retorno.
Sta (<i>Statement</i>)	Comandos em geral.
Sw (<i>Switch</i>)	Troca de argumento.
Var (<i>Variable</i>)	Variáveis em geral.

para que seja identificado o ponto de chamada da função, possibilitando que a mutação seja ou não habilitada.

Cada operador de mutação tem um certo escopo de aplicação. Por exemplo, alguns podem ser aplicados em referências a variáveis, outros em expressões e outros até em comandos inteiros. Assim, para cada conexão, cada operador tem um conjunto de pontos de aplicação próprio. É válido para todos operadores desse grupo, quando uma variável é um ponto de mutação, considerar-se que dereferências ou indexações àquela variável também sejam pontos de mutação. Por exemplo no programa abaixo, ao dizer que a variável *a* é um ponto de mutação, subentende-se que “**a*” e “*a*[*j* + 1]” também são pontos de mutação e devem ser alterados.

```
void g{int a[], int j} {
    *a = 2;
    a[j+1] = 3;
}
```

Exemplo de Programa

Os operadores desse grupo exigem que a mutação seja habilitada no ponto de chamada antes de ser aplicada. Por exemplo, suponha-se que o operador RetStaDel esteja sendo aplicado na conexão entre as funções *f* e *g*, sendo que *f* chama *g*. No ponto onde *f* chama *g* existe uma “notificação” de que *g* está sendo chamada nesse ponto e não por outro ponto do programa. Para essa “notificação” utiliza-se a macro PREPARE_MUTA antes da chamada da função *g*,

indicando que a mutação está habilitada. A macro `IF_MUTA` cuida de verificar se a mutação está habilitada.

```
float g(float x; float y) {  
    return x + y;  
}
```

```
int f() {  
    int i;  
    i = g(0.5, 2);  
}
```

Programa Original

```
float g(float x; float y) {  
    IF_MUTA(;; return x + y) ;  
}
```

```
int f() {  
    int i;  
    i = PREPARE_MUTA(g(0.5, 2)) ;  
}
```

Exemplo de Mutante

Levando em consideração o exemplo acima, caso a macro `IF_MUTA` retorne falso, o comando `return x + y;` é executado, caso contrário é executado a mutação, ou seja, é executado o programa sem o comando `return`.

Os exemplos utilizados para ilustrar a aplicação dos operadores de mutação mostram apenas o ponto da função que sofreu a mutação, sendo a macro `PREPARE_MUTA` não utilizada.

Na definição desses operadores os seguintes conjuntos foram utilizados (Delamaro, 1997):

- $P(g)$: é o conjunto de parâmetros formais de g . Esse conjunto inclui também referências a parâmetros do tipo ponteiro ou vetor. Por exemplo, se um parâmetro formal v é definido como “`int *v`”, v e “`*v`” pertencem a esse conjunto;
- $G(g)$: é o conjunto de variáveis globais utilizados na função g ;
- $L(g)$: é o conjunto de variáveis declaradas em g (variáveis locais);
- $E(g)$: é o conjunto de variáveis globais não utilizadas em g ; e
- $C(g)$: é o conjunto de constantes utilizadas em g .

Além desses conjuntos, Delamaro (1997) definiu mais um conjunto denominado conjunto de constantes requeridas (conjunto R). Esse conjunto contém valores especiais, relevantes para alguns tipos primitivos de dados da linguagem C e operadores associados a esses tipos. A Tabela 3.7 sumariza o conjunto dessas constantes.

Tabela 3.7: Conjunto de Constantes Requeridas - Mutações de Interface

<i>Tipo de Variável</i>	<i>Constantes Requeridas</i>
signed integer signed char signed long	-1, 1, 0, MAXINT, MININT
unsigned integer unsigned char unsigned long enum	-1, 1, 0, MAXUNSIGNED
float double	-1.0, 1.0, 0.0, -0.0
<i>As constantes MAXINT, MININT e MAXUNSIGNED correspondem respectivamente ao maior inteiro positivo, ao inteiro mais negativo e ao maior inteiro sem sinal. Esses valores são dependentes de máquinas e de tipos de dados.</i>	

Na Tabela 3.8 é descrita a função de cada operador pertencentes a esse grupo. Já na Figura 3.5 os operadores são subdivididos de acordo com suas funções.

Tabela 3.8: Operadores de Mutações de Interface - Grupo I

<i>Operador</i>	<i>Descrição</i>
I-CovAllEdg	Garante cobertura de desvios.
I-CovAllNod	Garante cobertura de nós.
I-DirVarAriNeg	Acrescenta negação aritmética em variáveis de interface.
I-DirVarBitNeg	Acrescenta negação de bit em variáveis de interface.
I-DirVarIncDec	Acrescenta incremento (++) e decremento (--) em variável de interface.
I-DirVarLogNeg	Acrescenta negação lógica em variáveis de interface.
I-DirVarRepCon	Troca variáveis de interface por elementos de C.
I-DirVarRepExt	Troca variáveis de interface por elementos de E.
I-DirVarRepGlo	Troca variáveis de interface por elementos de G.
I-DirVarRepLoc	Troca variáveis de interface por elementos de L.
I-DirVarRepPar	Troca variáveis de interface por elementos de P.
I-DirVarRepReq	Troca variáveis de interface por elementos de R.
I-IndVarAriNeg	Acrescenta negação aritmética em variáveis não de interface.
I-IndVarBitNeg	Acrescenta negação de bit em variáveis não de interface.
I-IndVarIncDec	Acrescenta incremento (++) e decremento (--) em variável não de interface.
I-IndVarLogNeg	Acrescenta negação lógica em variáveis não de interface.
I-IndVarRepCon	Troca variáveis não de interface por elementos de C.
I-IndVarRepExt	Troca variáveis não de interface por elementos de E.
I-IndVarRepGlo	Troca variáveis não de interface por elementos de G.
I-IndVarRepLoc	Troca variáveis não de interface por elementos de L.
I-IndVarRepPar	Troca variáveis não de interface por elementos de P.
I-IndVarRepReq	Troca variáveis não de interface por elementos de R.
I-RetStaDel	Elimina comando return.
I-RetStaRep	Troca comando return.

Grupo II - Mutações Efetuadas no Ponto de Chamada

Os operadores desse grupo são aplicados nos pontos onde a função f faz chamadas a função g . Eles são aplicados tanto nos argumentos da chamada à função quanto à chamada da função

Figura 3.5: Classificação dos Operadores de Mutação de Interface - Grupo I

como um todo. Quando um argumento é um ponto de mutação e esse argumento é uma expressão, então o operador é aplicado à expressão como um todo e não a partes da expressão como variáveis e constantes.

Na Tabela 3.9 são apresentados todos os operadores de mutação de interface pertencentes ao Grupo II descrevendo a função que cada um tem quando aplicado o critério Mutação de Interface. A Figura 3.6 mostra as subcategorias dos operadores de mutação desse grupo.

Tabela 3.9: Operadores de Mutação de Interface - Grupo II

Operador	Descrição
II-ArgAriNeg	Acrescenta negação aritmética antes de argumento.
II-ArgBitNeg	Acrescenta negação de bit antes de argumento.
II-ArgDel	Elimina argumento.
II-ArgIncDec	Incrementa e decrementa argumento.
II-ArgLogNeg	Acrescenta negação lógico antes de argumento.
II-ArgRepReq	Troca argumentos por elementos de R.
II-ArgStcAli	Troca posição de argumentos de tipos compatíveis.
II-ArgStcDif	Troca posição de argumentos de tipos diferentes.
II-FunCalDel	Elimina chamada de função.

A seguir é apresentado um experimento no qual os operadores de mutação descritos nesse capítulo, tanto para o teste de unidade quanto para o teste de integração, são analisados buscando-se reduzir o custo de aplicação dos critérios baseados em mutação por meio de heurísticas para determinação de mutantes equivalentes.

3.2 Descrição do Experimento

Este experimento tem como objetivo analisar teórica e empiricamente os operadores de mutação implementados nas ferramentas *Proteum* e *PROTEUM/IM*. A análise teórica é realizada

Figura 3.6: Classificação dos Operadores de Mutação de Interface - Grupo II

por meio da avaliação das regras estabelecida para a aplicação dos operadores, enquanto que a análise empírica utiliza dados coletados sobre o comportamento desses operadores como a probabilidade de gerar mutantes equivalentes ou mutantes que são facilmente distinguidos. Sua aplicação é composta das seguintes atividades:

1. Seleção de Programas;
2. Geração de Conjuntos de Casos de Teste;
3. Seleção de Ferramentas de Teste; e
4. Coleta e Análise dos Resultados.

A seguir, cada uma dessas atividades é detalhada considerando as informações sobre o experimentos referente a este trabalho.

3.2.1 Seleção dos Programas

Este experimento foi conduzido a partir de um grupo formado por seis programas utilitários do UNIX escritos na linguagem C. Tais programas além de terem sido utilizados em estudos anteriores (Wong, 1993; Delamaro, 1997; Wong et al., 1997; Barbosa, 1998; Vincenzi, 1998), devido ao seu uso intenso, possuem uma baixa probabilidade de apresentarem erros naturais em seu código. Além disso, procura-se selecionar programas que possuam em sua implementação construções sintáticas para que os operadores de mutação possam ser aplicados pois aplicando um determinado operador op , pode ocorrer que, em um programa P este não gere mutantes. Isto ocorre quando P não contem nenhuma estrutura do domínio das mudanças sintáticas impostas pelo operador op . Por exemplo, considere o operador SDWD para a linguagem C que

troca comandos do-while por comandos while. Se P não possuir nenhum comando do-while, a aplicação do operador SDWD não gerará mutantes.

A Tabela 3.10 apresenta a descrição, o número de funções e o total de linhas de código (LOC) dos programas utilizados.

Tabela 3.10: Conjunto de Programas Utilizados no Experimento

Programas	Descrição	Funções Chamadas	LOC
Cal	Apresenta um calendário para o ano ou mês especificado.	4	119
Checkeq	Informa os delimitadores ausentes ou desbalanceados e pares .EQ/.EN.	1	76
Comm	Seleciona ou rejeita linhas comuns entre dois arquivos.	7	119
Look	Procura palavras em um dicionário ou linhas em uma lista ordenada.	3	111
Sort	Classifica e realiza merge em arquivos.	19	628
Uniq	Informa ou remove linhas adjacentes duplicadas.	5	103

Observa-se que, 5 dos 6 programas utilizados no experimento possuem aproximadamente 100 LOC's, ao contrário do programa sort que possui uma complexidade maior, 628 LOC's. Nas Tabelas 3.11 e 3.12 são apresentados o total de mutantes gerados, equivalentes e q-equivalentes utilizando as ferramentas *Proteum* e *PROTEUM/IM*, respectivamente.

Tabela 3.11: Complexidade dos Programas: Ferramenta *Proteum*

Programas	Mutantes Gerados	Mutantes Equivalentes	Mutantes Q-Equivalentes	Porcentagem de Equivalentes	Porcentagem de Q-Equivalentes
Cal	4332	221	95	5,10%	2,19%
Checkeq	3099	206	17	6,65%	0,55%
Comm	1728	166	29	9,61%	1,68%
Look	2056	143	114	6,96%	5,55%
Sort	22419	1074	1676	4,79%	7,48%
Uniq	1619	94	77	5,81%	4,76%
Total	35253	1904	2008	5,4%	5,7%

Tabela 3.12: Complexidade dos Programas: Ferramenta *PROTEUM/IM*

Programas	Mutantes Gerados	Mutantes Equivalentes	Mutantes Q-Equivalentes	Porcentagem de Equivalentes	Porcentagem de Q-Equivalentes
Cal	4350	488	80	11,22%	1,84%
Checkeq	2974	12	6	0,40%	0,20%
Comm	2952	481	30	16,29%	1,02%
Look	1825	181	172	9,92%	9,43%
Sort	20554	5640	1017	27,44%	4,95%
Uniq	1943	185	35	9,52%	1,80%
Total	34598	6987	1340	20,2%	3,87%

Como pode ser observado, é gerado um grande número de mutantes para os programas em teste (35253 referentes o teste de unidade e 34598 referentes o teste de integração), sendo o programa sort o responsável por gerar grande parte desses mutantes, para ambos os critérios, devido a sua complexidade em termos de linhas de código. Já o programa Uniq gera um pequeno número de mutantes quando aplicados os operadores de mutação referentes ao teste de unidade e o Comm gera o menor número de mutantes para o teste de integração, devido ao fato

de possuir apenas uma chamada de função. Vale ressaltar que, para o conjunto de programas utilizados, alguns operadores de mutação não geraram mutantes, por isso não foi possível fazer uma análise empírica dos mesmos. Dos 71 operadores de mutação para o teste de unidade, 10 não geraram mutantes, porém, para o teste de integração todos os 33 operadores geraram mutantes.

Como dito anteriormente, pela atividade de determinação de mutantes equivalentes ser uma questão indecidível, a mesma foi feita manualmente e as informações coletadas são de fundamental importância para o desenvolvimento de heurísticas que permitam sua automatização, reduzindo o custo e o esforço de aplicação dos critérios.

3.2.2 Seleção de Ferramentas de Teste

A seleção das ferramentas de teste deve levar em consideração quais critérios serão analisados, a linguagem nas quais os programas estão escritos e, principalmente, o suporte oferecido para a realização de experimentos, ou seja, deve-se observar se a funcionalidade e o conjunto de informações disponibilizados pela ferramenta são suficientes para atingir os objetivos propostos.

Em ferramentas típicas para a aplicação dos critérios baseados em mutação, essas atividades se traduzem em um conjunto essencial de tarefas que devem ser executadas:

- Definição de casos de teste;
- Execução do programa em teste;
- Geração de mutantes;
- Execução dos mutantes;
- Análise dos mutantes vivos;
- Cálculo do escore de mutação; e
- Geração de relatórios.

Para o experimento em questão, foram utilizadas as ferramentas *Proteum* e *PROTEUM/IM* por possuírem uma série de características que as tornam adequadas para a realização deste trabalho. Como dito anteriormente, hoje essas ferramentas estão integradas em um único ambiente denominado *PROTEUM/IM 2.0* (Delamaro et al., 2000). Porém, para essa integração, os operadores de mutação para o teste de unidade sofreram algumas alterações em suas implementações. Essas alterações justificam a escolha das ferramentas *Proteum* e *PROTEUM/IM* para aplicação do experimento uma vez que a sequência dos mutantes gerada pela ferramenta

PROTEUM/IM 2.0 não é a mesma das versões anteriores, ficando inviável, por questão de tempo, a geração de 11 sessões de teste para cada programa e critério como descrito na Seção 3.2.3. Mais informações sobre essas alterações podem ser encontradas em (Jorge et al., 2002b).

O teste utilizando-se essas ferramentas é dirigido por sessões de teste. O estado de uma sessão de teste é caracterizado por uma base de dados identificada por um nome e composta, basicamente, por dados sobre os casos de teste, mutantes utilizados e alguns arquivos intermediários que descrevem o programa sendo testado. Uma sessão de teste é constituída de uma sequência de operações realizadas sobre essa base de dados através de chamadas aos programas que compõem as ferramentas (Delamaro, 1997).

A vantagem de se utilizar as sessões de teste é que o testador pode, por meio das operações disponíveis nas ferramentas, obter diferentes resultados a partir de uma única sessão de teste, realizando operações sobre a mesma. Por exemplo, as ferramentas *Proteum* e *PROTEUM/IM* oferecem as seguintes funcionalidades:

- Habilitar e desabilitar diferentes grupos de mutantes;
- Habilitar e desabilitar diferentes operadores de mutação; e
- Habilitar e desabilitar diferentes conjuntos de casos de teste.

Desse modo, diferentes combinações de conjuntos de casos de teste podem ser avaliadas com diferentes conjuntos de mutantes em uma mesma sessão de teste. Pode-se, por exemplo, avaliar qual a capacidade de um conjunto de casos de teste adequado a um único operador em distinguir os mutantes gerados pelos demais, característica essa fundamental para a condução dos experimentos realizados neste trabalho.

3.2.3 Geração dos Conjuntos de Casos de Teste

Como já foi dito, o teste exaustivo é desejável para se testar um programa, porém sabe-se que é inviável por razões de custo e tempo. A maioria das técnicas e critérios apresentados anteriormente auxiliam a atividade de teste dividindo o domínio de entrada do programa em subdomínios e fazendo com que pelo menos um ponto de cada subdomínio seja executado.

A tarefa de geração de dados de teste visa a selecionar pontos de cada subdomínio a fim de satisfazer um determinado critério, revelando um maior número de erros possível. Embora a automatização dessa tarefa seja desejável, não existe um algoritmo de propósito geral para determinar um conjunto de casos de teste que satisfaça um dado critério. Não é possível nem mesmo determinar se esse conjunto existe, o que torna o problema de geração de casos de teste indecidível.

Visto que os melhores pontos do domínio para a seleção de dados de teste são aqueles com maior probabilidade de revelar erros, a estratégia empregada para selecionar esses pontos é de fundamental importância, pois dela depende a efetividade do critério.

Uma das principais estratégias para geração de dados é a geração aleatória que tem sido a mais utilizada para a condução de estudos empíricos, na qual pontos do domínio são selecionados aleatoriamente. Esta estratégia não garante a seleção dos melhores pontos, nem mesmo a satisfação do critério, entretanto, é de fácil automatização e capaz de gerar grandes conjuntos de dados de teste a baixo custo. Além disso, a técnica aleatória elimina qualquer possível influência do testador em conduzir a geração dos dados de teste conforme o conhecimento prévio dos programas utilizados.

Para a realização deste experimento, para cada programa e cada critério (Análise de Mutantes e Mutação de Interface) foi criado um *pool* de casos de teste adequado o qual possui a seguinte composição:

- casos de teste funcionais *ad hoc* (DT_{func}): gerados a partir da especificação funcional de cada programa;
- casos de teste aleatórios (DT_{aleat}): obtidos dos experimentos desenvolvidos por Wong (1993) que comparava os critérios Análise de Mutantes e Todos-Usos; e
- casos de teste manuais (DT_{manu}): gerados a partir dos mutantes que permaneceram vivos após a aplicação dos casos de teste funcionais e aleatórios. Os mutantes foram analisados e criados casos de teste específicos para distingui-los.

A Tabela 3.13 apresenta e o Gráfico da Figura 3.7 ilustra uma síntese desses dados.

Tabela 3.13: Número de Casos de Teste Utilizados por Programa

Programas	Análise de Mutantes			Mutação de Interface		
	DT_{func}	DT_{aleat}	DT_{manu}	DT_{func}	DT_{aleat}	DT_{manu}
Cal	1	162	21	1	162	2
Checkeq	12	166	35	12	166	18
Comm	39	754	8	39	754	46
Look	52	193	7	52	193	12
Sort	107	997	172	107	997	128
Uniq	42	431	17	42	431	36

Ressalta-se que para os programas Cal, Checkeq, Comm, Look e Uniq, que possuem um tamanho aproximadamente de 100 LOC's, a partir desse *pool*, mais 10 seqüências diferentes de casos de teste foram geradas totalizando 11 conjuntos de casos de teste para cada programa e critério. Já para o programa sort (628 LOC's) uma única sessão de teste foi gerada devido ao alto custo computacional de se gerarem mais 10 sessões de teste para esse programa. Assim sendo, para avaliar o número equivalentes e q-equivalentes, os 6 programas foram utilizados,

Figura 3.7: Cardinalidade dos Conjuntos de Casos de Teste AM-adequado e MI-adequado

tendo em vista que essa informação pode ser obtida a partir de uma única sessão de teste, pois a única diferença entre as sessões de teste de um mesmo programa é o conjunto de casos de teste necessário para matar os mutantes não equivalentes e não a quantidade desses mutantes. Entretanto, nos casos em que é necessário a coleta de informações estatísticas a respeito dos operadores, por exemplo o número de mutantes que são mortos por uma determinada quantidade de casos de teste, os 5 programas que possuem 11 conjuntos de casos de teste foram utilizados.

É importante que diferentes conjuntos de casos de teste sejam avaliados pois, para um dado critério, pode existir um número infinito de conjuntos de casos de teste que o satisfaça e, selecionar apenas um desses conjuntos pode levar a falsas conclusões (Wong et al., 1997).

3.2.4 Coleta e Análise dos Dados

Terminada a fase anterior, as informações relevantes para se atingir o objetivo proposto são coletadas a partir da base de dados construída durante a geração das sessões de teste.

Foram coletadas diferentes informações de modo a permitir a determinação de:

- Quais operadores geram o maior número de mutantes;
- Quais operadores geram o maior número de mutantes equivalentes;
- Quais operadores geram o maior número de mutantes q-equivalentes; e
- Quais operadores geram mutantes que morrem facilmente, ou seja, mutantes que morre com um grande número de casos de teste.

3.3 Avaliação dos Operadores de Mutação

Para avaliar os operadores de mutação, é feita uma análise teórica procurando descrevê-los detalhadamente com o objetivo de estabelecer heurísticas para a determinação de mutantes equivalentes. Em seguida, é feita uma análise empírica dos operadores de mutação buscando determinar quais operadores geram mais mutantes equivalentes, proporcionando *guidelines* ao testador para facilitar na atividade de identificação desses mutantes e fornecer subsídios para a estabelecimento de estratégias de teste baseadas no Teste de Mutação que sejam incrementais, de baixo custo e eficazes, e apóiem todo o ciclo de desenvolvimento de software.

O padrão utilizado para análise dos operadores é apresentado a seguir.

SIGLA - Nome do Operador

Para cada operador é apresentado seu nome e a sigla que o identifica.

Descrição:

Também é elaborada uma descrição para o operador em questão, exemplos contendo um trecho de código com a estrutura sintática necessária para a aplicação do operador e trechos de código mutante.

Exemplos:

Trecho de Código Original

Programa Original

Trecho de Código Mutante 1

Mutante 1

:

Trecho de Código Mutante n

Mutante n

Informações Estatísticas:

<i>Mutantes Gerados</i>	<i>Mutantes Equiv.</i>	<i>Mutantes Q-Equiv.</i>	<i>Mutantes Mortos</i>	<i>Mortos</i>			
				<i>Stdout</i>	<i>Retcode</i>	<i>Timeout</i>	<i>Trap</i>
1,322%	7,002%	6,346%	86,652%	83,586%	15,404%	1,01%	0%

<i>Casos de Teste Habilitados</i>									
<i>10%</i>	<i>20%</i>	<i>30%</i>	<i>40%</i>	<i>50%</i>	<i>60%</i>	<i>70%</i>	<i>80%</i>	<i>90%</i>	<i>100%</i>
77,24%	6,04%	3,02%	3,02%	3,93%	0,91%	4,03%	0,4%	0,81%	0,6%

Porcentagem de Casos de Teste (Índice de Mortalidade dos Mutantes)									
[0-10]	(10-20]	(20-30]	(30-40]	(40-50]	(50-60]	(60-70]	(70-80]	(80-90]	(90-100]
12,99%	10,07%	14,5%	7,65%	12,69%	8,36%	11,78%	4,63%	0,00%	17,33%

Para cada operador também são coletadas informações estatísticas, como mostram as tabelas acima. Por exemplo, a primeira tabela fornece a porcentagem de mutantes gerados em relação ao total de mutantes para cada sessão de teste, porcentagem de mutantes equivalentes, q-equivalentes e mortos em relação ao número de mutantes gerados pelo operador e porcentagem de mutantes mortos por tipo de morte³.

Como dito anteriormente, para construção da primeira e segunda tabelas, foram utilizadas as 11 sessões de teste pelo fato do conjunto de casos de teste de cada sessão ser diferente. A segunda tabela mostra o incremento de porcentagem de mutantes mortos a medida que mais casos de teste são adicionados. Primeiramente, do conjunto adequado de casos de teste, foram aplicados apenas os primeiros 10% dos casos, na média para 11 sessões, 77,24% dos mutantes mortos gerados por aquele operador morrem. Habilitando mais 10% dos casos de teste (agora com 20% dos casos de teste habilitados), mais 6,04% dos mutantes são mortos.

As ferramentas utilizadas na aplicação do experimento (*Proteum* e *PROTEUM/IM*), permitem que todos os mutantes, independentemente de já estar morto ou não, sejam executados com todos os casos de teste. Com isso, a terceira tabela foi construída e apresenta a porcentagem de mutantes mortos por um determinado número de casos de teste que chamamos de Índice de Mortalidade dos Mutantes. Tomando essa tabela como exemplo, 12,99% dos mutantes não equivalentes gerados pelo operador, são mortos por apenas [0%-10%] do total de casos de teste. Esses são os mutantes considerados mais difíceis de serem mortos, por serem mortos por uma “baixa” quantidade de casos de teste. Por outro lado, 17,33% dos mutantes morrem com quase todos os casos de teste (no intervalo [90%-100%]), caracterizando esses mutantes como mutantes mais fáceis de serem mortos. Essa informação é utilizada posteriormente no Capítulo 4 para o estabelecimento de estratégias de teste incrementais que definem uma sequência de aplicação dos operadores de mutação visando a um menor custo.

Informações Sobre Equivalência:

Quando pertinente, são feitas considerações que auxiliem na determinação de mutantes equivalentes e observações sobre os resultados estatísticos sobre equivalência obtidos para dado operador.

Neste trabalho considerou a existência de dois tipos de equivalência:

1. A partir da semântica do operador; e
2. Para um determinado domínio de aplicação.

³Os tipos de morte implementados nas ferramentas *Proteum* e *PROTEUM/IM* são detalhados na Seção 2.3.2.3.

A definição de um padrão de equivalência a partir da semântica dos operadores leva em consideração mutações que sempre são equivalentes ao programa original. Alguns exemplos desses mutantes são mostrados na Tabela 3.14. Observa-se que os exemplos das linhas 2 e 3 da tabela não são válidos para todas as situações:

- Só valem se as sub-expressões forem booleanas, no caso da linguagem C, 0 ou 1. A regra vale, por exemplo, para $(a < b) || (c > d)$, cujo resultado, se utilizado apenas como predicado de um desvio, é o mesmo que o da expressão $(a < b) + (c > d)$. No entanto não vale por exemplo, se a expressão original for $(-1) || (1)$ cujo resultado difere de $(-1) + (1)$; e
- Dependem de onde estão sendo aplicadas. Em predicados de desvios como em comando `if` ou de laço a equivalência pode ser identificada, porém sua utilização dentro de uma expressão, o que é possível na linguagem C, em geral, não caracteriza a equivalência. Por exemplo:

$a = b - (0 \wedge 1);$ // resulta $a = b - 1$

$a = b - (0 - 1);$ // resulta $a = b + 1$

Tabela 3.14: Construções Típicas de Mutantes Equivalentes

Programa Original	Programa Mutante
$x=0$	$x*=0$
$\{e1\} ; ! \{e2\}$	$\{e1\} + \{e2\}$
$\{e1\} \wedge \{e2\}$	$\{e1\} - \{e2\}$

Para estabelecer um padrão de equivalência para um determinado domínio de aplicação, foram analisados dados coletados a respeito dos operadores de mutação quando aplicados no conjunto de programas descritos na Tabela 3.10, definindo quais operadores geram mais mutantes equivalentes. Analisando-se um programa específico, o testador terá que decidir, utilizando seu conhecimento sobre o programa em questão, se determinado mutante vivo é ou não equivalente. Uma vez que ele decide que determinado mutante é equivalente, a “inferência” utilizada para a sua detecção pode ser utilizada na detecção de outros mutantes equivalentes, caracterizando um padrão de equivalência para aquele determinado programa. Por exemplo, considere um programa em que a partir de determinado ponto, duas variáveis a e b assumem sempre os mesmos valores. Qualquer mutante que tenha a variável a trocada pela variável b , a partir do ponto no qual as duas têm o mesmo valor, será um mutante equivalente.

Quando não forem possível definir um padrão de equivalência mais genérico que possa ser aplicado para outros programas e outros domínios, é possível, com base nas informações estatísticas coletadas, fornecer *guidelines* ao testador para auxiliá-lo na atividade de análise dos

mutantes vivos. Suponha-se que para um determinado operador *op*, tem-se uma indicação de que 94,5% dos mutantes vivos gerados pelo operador são equivalentes contra 5,5% de mutantes que ainda podem ser mortos. Estes certamente seriam os primeiros candidatos à identificação como equivalentes, ou mesmo à não geração.

Uma outra maneira de identificar um padrão de equivalência a partir da semântica dos operadores, é verificar se um operador não possui características sintáticas para sua aplicação que “inclua” as características de um outro operador, ou seja, se aplicarmos um determinado operador, o conjunto de casos de teste adequado para matar todos seus mutantes com certeza será adequado para matar os mutantes de um outro operador. Vale ressaltar que, em alguns casos pode ocorrer de operadores, mesmo que não se incluam teoricamente, se incluam para o domínio de aplicação especificado, caracterizando um padrão de equivalência para esse domínio de aplicação.

A seguir, a título de ilustração, é apresentada a descrição de um operador de mutação de cada grupo de mutação para o teste de unidade (constantes, operadores, comandos e variáveis) e integração (grupo I e grupo II) com os resultados obtidos após a aplicação das análises estabelecidas. Informações detalhadas a respeito de cada operador podem ser encontradas em (Jorge et al., 2002b).

3.3.1 Operadores de Mutação para o Teste Unidade

CRCR - Required Constant Replacement (Mutação de Constantes)

Descrição:

Este operador troca cada referência escalar por constantes requeridas dependendo do tipo da referência. Esse conjunto de constantes é apresentado na Tabela 3.15.

Tabela 3.15: Conjunto de Constantes Requeridas - Mutação de Unidade

<i>Tipo de Variável</i>	<i>Constantes Requeridas</i>
integer	-1, 1, 0
float	1.0, -1.0, 0.0, -0.1, 0.1
char	'\\0', '\\177', '\\200', '\\377'

Suponha que o conjunto na primeira linha da Tabela 3.15 seja o conjunto *C1*, o segundo o conjunto *C2* e o terceiro o conjunto *C3*. Quando aplicado o operador CRCR, cada referência escalar é substituída por um elemento de *C1*, *C2* ou *C3*. Se a referência escalar é inteira, *C1* é usado. Caso as referências sejam pontos flutuantes ou caracteres, *C2* e *C3* são usados, respectivamente.

Exemplos:

```
int pa;
...
if(pa>=la || *pa=='\n')
    if(pb<lb && *pb!='\n')
        return(fp->rflg);
```

Programa Original

```
int pa;
...
if(0>=la || *pa=='\n')
    if(pb<lb && *pb!='\n')
        return(fp->rflg);
```

Mutante 1

```
int pa;
...
if(1>=la || *pa=='\n')
    if(pb<lb && *pb!='\n')
        return(fp->rflg);
```

Mutante 2

```
int pa;
...
if(-1>=la || *pa=='\n')
    if(pb<lb && *pb!='\n')
        return(fp->rflg);
```

Mutante 3

Informações Estatísticas:

Mutantes Gerados	Mutantes Equiv.	Mutantes Q-Equiv.	Mutantes Mortos	Mortos			
				Stdout	Retcode	Timeout	Trap
5,12%	3,39%	3,77%	92,84%	85,78%	5,89%	8,32%	0,00%

Casos de Teste Habilitados									
10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
51,15%	13,30%	5,53%	5,89%	10,15%	1,82%	6,50%	2,19%	2,00%	1,46%

Porcentagem de Casos de Teste (Índice de Mortalidade dos Mutantes)									
[0-10]	(10-20]	(20-30]	(30-40]	(40-50]	(50-60]	(60-70]	(70-80]	(80-90]	(90-100]
33,78%	14,16%	15,92%	11,36%	6,80%	6,50%	6,14%	2,55%	0,67%	2,13%

Informações Sobre Equivalência:

Dependendo do programa, esse operador gera mutantes equivalentes caso existam referências escalares com valores iguais as constantes requeridas. Por exemplo, suponhamos que seja atribuída a variável *pa* o valor 0 antes do ponto de mutação, ou seja, a variável passará a possuir um valor constante e que é igual ao valor da constante requerida, com isso esse mutante é equivalente como mostra o trecho de código mutante abaixo.

```
int pa;
...
pa = 0;
...
if( 0 >= la || *pa == '\n' )
    if( pb < lb && *pb != '\n' )
        return( fp->rflg );
```

Trecho de Código Mutante

OLBN - Logical by Bitwise Operator Replacement (Mutao de Operadores)

O operador OLBN tem como objetivo substituir operadores lgicos por operadores do tipo *bitwise*⁴ sem atribuio.

Exemplos:

```
if( eargv[i][0] == '-' && eargv[i][1] == '\0' )
    return(0);
```

Programa Original

```
if( eargv[i][0] == '-' | eargv[i][1] == '\0' )
    return(0);
```

Mutante 1

```
if( eargv[i][0] == '-' & eargv[i][1] == '\0' )
    return(0);
```

Mutante 2

```
if( eargv[i][0] == '-' ^ eargv[i][1] == '\0' )
    return(0);
```

Mutante 3

⁴Um operador *bitwise* aplica operaes entre os *bits* dos operandos (operao *bit a bit*).

Informações Estatísticas:

<i>Mutantes Gerados</i>	<i>Mutantes Equív.</i>	<i>Mutantes Q-Equív.</i>	<i>Mutantes Mortos</i>	<i>Mortos</i>			
				<i>Sidout</i>	<i>Retcode</i>	<i>Timeout</i>	<i>Trap</i>
0,56%	28,13%	3,13%	68,75%	89,68%	7,94%	2,38%	0,00%

<i>Casos de Teste Habilitados</i>									
<i>10%</i>	<i>20%</i>	<i>30%</i>	<i>40%</i>	<i>50%</i>	<i>60%</i>	<i>70%</i>	<i>80%</i>	<i>90%</i>	<i>100%</i>
53,17%	23,02%	5,56%	2,38%	2,38%	0,79%	7,94%	0,00%	4,76%	0,00%

<i>Porcentagem de Casos de Teste (Índice de Mortalidade dos Mutantes)</i>									
<i>[0-10]</i>	<i>(10-20]</i>	<i>(20-30]</i>	<i>(30-40]</i>	<i>(40-50]</i>	<i>(50-60]</i>	<i>(60-70]</i>	<i>(70-80]</i>	<i>(80-90]</i>	<i>(90-100]</i>
38,10%	18,25%	13,49%	3,18%	4,76%	7,94%	5,56%	5,56%	0,79%	2,38%

Informações Sobre Equivalência:

Este operador de mutação, quando aplicado em uma operação lógica (operadores *booleanos*), terá todos os mutantes que substituam o operador lógico `&&` pelo operador *Bitwise* (`&`) como equivalentes como mostra a Tabela 3.16, caracterizando um padrão de equivalência a partir da semântica do operador⁵.

Tabela 3.16: Tabela Lógica - Operadores `&&` e `&`.

<code>&&</code>	<code>&</code>
<code>0 0 = 0</code>	<code>0 0 = 0</code>
<code>1 0 = 0</code>	<code>1 0 = 0</code>
<code>0 1 = 0</code>	<code>0 1 = 0</code>
<code>1 1 = 1</code>	<code>1 1 = 1</code>

Isto também é válido para o operador lógico (`|`), quando os mutantes forem gerados com a substituição pelo operador *Bitwise* (`|`), como mostra a Tabela 3.17.

Tabela 3.17: Tabela Lógica - Operadores `|` e `|`.

<code> </code>	<code> </code>
<code>0 0 = 0</code>	<code>0 0 = 0</code>
<code>1 0 = 1</code>	<code>1 0 = 1</code>
<code>0 1 = 1</code>	<code>0 1 = 1</code>
<code>1 1 = 1</code>	<code>1 1 = 1</code>

Como pode ser observado nos dados estatístico desse operador, grande parte dos seus mutantes são equivalentes (aproximadamente 28%) e, levando-se em consideração que parte desses mutantes foram gerados a partir de modificações semelhantes as das Tabelas 3.16 e 3.17, esses mutantes não precisariam ser gerados e teríamos uma redução de custo significativa na aplicação do critério Análise de Mutantes.

⁵Todo valor diferente de 0, na linguagem C, é verdadeiro.

SSWM - Switch Statement Mutation (Mutação de Comandos)

Esse operador procura avaliar os valores utilizados nos `cases`'s do comando `switch` adicionando a função `TRAP_ON_CASE()` em cada `case`, ou seja, temos um total de n mutantes para um comando `switch` assumindo que exista n rótulos `case`'s. A aplicação desse operador permite garantir a cobertura de todos os `cases`'s mesmo que exista algum desses rótulos sem comandos de desvio (`break`, `return`) pois quando isso ocorre, a mutação inclui um comando de desvio `goto` forçando que todos os `case`'s sejam executados como mostra o exemplo abaixo.

```
switch(a) {  
    case 1: S1;  
    case 2: S2;  
}
```

Exemplo

```
switch(a) {  
    case 1: TRAP_ON_CASE();  
           S1;  
    case 2: S2;  
}
```

Mutante 1

```
switch(a) {  
    case 1: S1;  
           goto __60__4__L__;  
    case 2: TRAP_ON_CASE(); __60__4__L__;  
           S2;  
}
```

Mutante 2

Observa-se que o primeiro mutante é gerado “normalmente”, apenas colocando a função `TRAP_ON_CASE()` no primeiro rótulo do comando `switch`. Já no segundo mutante, como o primeiro `case` não possui nenhum comando de desvio, é adicionado o comando `goto`, forçando a execução do segundo `case` pois, caso o primeiro `case` não possua um comando de desvio, basta um caso de teste que execute-o para matar ambos os mutantes.

Já nos exemplos de mutantes abaixo, para matar-los basta fazer com que cada um dos rótulos utilizados nos `case`'s do comando `switch` seja executado, garantindo a cobertura de todos os `case`'s.

Exemplos:

```

switch(*s) {
    case '\0':
        return;
    case 'b':
        p->bflg[k]++;
        break;
}

```

Programa Original

```

switch(*s) {
    case '\0': TRAP_ON_CASE();
        return;
    case 'b':
        p->bflg[k]++;
        break;
}

```

Mutante 1

```

switch(*s) {
    case '\0':
        return;
    case 'b': TRAP_ON_CASE();
        p->bflg[k]++;
        break;
}

```

Mutante 2

Informações Estatísticas:

<i>Mutantes Gerados</i>	<i>Mutantes Equiv.</i>	<i>Mutantes Q-Equiv.</i>	<i>Mutantes Mortos</i>	<i>Mortos</i>			
				<i>Stdout</i>	<i>Retcode</i>	<i>Timeout</i>	<i>Trap</i>
0,12%	0,00%	0,00%	100%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%

<i>Casos de Teste Habilitados</i>									
<i>10%</i>	<i>20%</i>	<i>30%</i>	<i>40%</i>	<i>50%</i>	<i>60%</i>	<i>70%</i>	<i>80%</i>	<i>90%</i>	<i>100%</i>
68,42%	10,53%	5,26%	0,00%	5,26%	2,63%	2,63%	5,26%	0,00%	0,00%

<i>Porcentagem de Casos de Teste (Índice de Mortalidade dos Mutantes)</i>									
<i>[0-10]</i>	<i>(10-20]</i>	<i>(20-30]</i>	<i>(30-40]</i>	<i>(40-50]</i>	<i>(50-60]</i>	<i>(60-70]</i>	<i>(70-80]</i>	<i>(80-90]</i>	<i>(90-100]</i>
25,00%	20,00%	20,00%	5,00%	10,00%	7,50%	7,50%	0,00%	0,00%	5,00%

Informações Sobre Equivalência:

Os mutantes gerados com a aplicação desse operador de mutação só serão equivalentes quando a função `TRAP_ON_CASE()` estiver em um bloco de comandos não executável⁶ pois, caso contrário, as funções serão executadas e os mutantes serão mortos como acontece com o operador `STRP`⁷.

Pode-se dizer que o operador `STRP` é mais “genérico” pois aplica a função `TRAP_ON_STAT()` em bloco de comandos, incluindo os `case's`. Como o operador `SSWM` inclui a função `TRAP_ON_CASE()` somente nos `case's` do comando `switch (e)`, pode-se dizer que um conjunto de casos de teste `STRP`-adequado vai ser `SSWM`-adequado. Porém, caso algum dos `case's` não possua um comando de desvio, o teste do restante dos `case's` será comprometido tornando a afirmação acima incorreta. Caso contrário, se todos os `case's` possuírem um comando de desvio um conjunto de casos de teste `STRP`-adequado será também `SSWM`-adequado. Esta relação é apresentada na Tabela 3.18 obtida por meio da aplicação do experimento no qual verificou-se a cobertura que um conjunto de casos de teste `STRP`-adequado tem sobre os mutantes gerados pelo operador `SSWM` e vice-versa.

Como pode ser observado com os dados apresentados, para os seis programas utilizados no experimento, o operador `STRP` sempre inclui, em termos de cobertura, o operador `SSWM` não sendo verdadeiro o inverso. Assim sendo, sempre que o operador `STRP` tiver sido aplicado em programas que possuam comandos de desvio em seus `case's`, não se faz necessário gerar os mutantes do operador `SSWM` diminuindo o custo de aplicação do critério Análise de Mutantes.

Tabela 3.18: Análise de Inclusão Entre os operadores `STRP` e `SSWM`

Programas	Operadores	
	<code>STRP->SSWM</code>	<code>SSWM->STRP</code>
Cal	1.0000	0.9268
Checkeq	1.0000	1.0000
Comm	1.0000	0.8350
Look	1.0000	0.8750
Sort	1.0000	1.0000
Uniq	1.0000	0.8111
Média	1.0000	0.9080

VDTR - Domain Traps (Mutação de Variáveis)

Descrição:

⁶ Isso é válido para a aplicação de todos os operadores de mutação. Todos os mutantes, quando gerados a partir de um bloco de comandos não executável, sempre serão equivalentes.

⁷ Este operador é projetado para revelar códigos não executáveis do programa a ser testado. Cada bloco do grafo de programa é substituído sistematicamente pela função `TRAP_ON_STAT()`. Quando `TRAP_ON_STAT()` é executada o mutante é morto.

Cada referência escalar x é substituída pelas chamadas às funções `TRAP_ON_ZERO(x)`, `TRAP_ON_POSITIVE(x)` e `TRAP_ON_NEGATIVE(x)`. Estas funções abortam a execução dos mutantes caso a expressão tenha o valor zero, positivo e negativo, respectivamente, como mostra a Tabela 3.19.

Tabela 3.19: Funções Utilizadas pelo Operador VDTR

<i>Função</i>	<i>Descrição</i>
TRAP_ON_ZERO	Mutante é morto se o argumento é zero, senão retorna o valor do argumento.
TRAP_ON_POSITIVE	Mutante é morto se o argumento é positivo, senão retorna o valor do argumento.
TRAP_ON_NEGATIVE	Mutante é morto se o argumento é negativo, senão retorna o valor do argumento.

Exemplos:

```
if(tabchar) {
    . . .
}
```

Programa Original

```
if( TRAP_ON_ZERO(tabchar) ) {
    . . .
}
```

Mutante 1

```
if( TRAP_ON_POSITIVE(tabchar) ) {
    . . .
}
```

Mutantes 2

```
if( TRAP_ON_NEGATIVE(tabchar) ) {
    . . .
}
```

Mutante 3

Informações Estatísticas:

<i>Mutantes Gerados</i>	<i>Mutantes Equiv.</i>	<i>Mutantes Q-Equiv.</i>	<i>Mutantes Mortos</i>	<i>Mortos</i>			
<i>Stdout</i>	<i>Retcode</i>	<i>Timeout</i>	<i>Trap</i>				
4,27%	40,65%	4,07%	55,28%	14,43%	0,25%	1,10%	84,23%

Casos de Teste Habilitados									
10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
62,96%	7,46%	2,44%	4,77%	6,97%	2,44%	6,72%	2,93%	2,81%	0,49%

Porcentagem de Casos de Teste (Índice de Mortalidade dos Mutantes)									
[0-10]	(10-20]	(20-30]	(30-40]	(40-50]	(50-60]	(60-70]	(70-80]	(80-90]	(90-100]
27,75%	12,35%	17,73%	8,44%	7,21%	6,72%	6,60%	3,67%	2,08%	7,46%

Informações Sobre Equivalência:

Quando aplicado esse operador de mutação em variáveis do tipo `char` e `unsigned int`, os mutantes gerados com a função `TRAP_ON_NEGATIVE()` sempre serão equivalentes, visto que variáveis desses tipos não assumem valores negativos.

Vale destacar que, mesmo para variáveis escalares de outros tipos (`int`, `long`, `short`), que podem assumir valores negativos, positivos e zero, esse operador pode gerar mutantes equivalentes caso, para o programa em questão, o domínio de valores que determinadas variáveis possa assumir seja restrito, ou seja, se a variável que está sofrendo a mutação em nenhum ponto do programa assumir os valores:

- zero - todos os mutantes com `TRAP_ON_ZERO()` serão equivalentes;
- positivo - todos os mutantes com `TRAP_ON_POSITIVE()` serão equivalentes;
- negativo - todos os mutantes com `TRAP_ON_NEGATIVE()` serão equivalentes.

Além desse operador de mutação gerar grande parte do total dos mutantes (4,27%), 40,65% deles são equivalentes, ou seja, caso esses mutantes não sejam gerados, haverá uma redução significativa em termos do número de mutantes equivalentes na aplicação da Análise de Mutantes.

A coleta desse tipo de informação foi realizada para todos os operadores de mutação para o teste de unidade e a Tabela 3.20 sintetiza os dados coletados. Mais informações podem ser encontradas em (Jorge et al., 2002b).

Na segunda coluna da Tabela 3.20 é apresentado o número de mutantes gerados pelo operador quando aplicado nos seis programas utilizados no experimento e a terceira coluna representa a porcentagem de mutantes do operador em relação ao total de mutantes gerados com a aplicação de todos os operadores de mutação. O número de mutantes equivalentes e q-equivalente também são dados pela quarta e quinta coluna, respectivamente. A sexta coluna representa a porcentagem de mutantes equivalentes e a sétima coluna a porcentagem de mutantes q-equivalentes em relação ao número de mutantes gerados pelo operador. Referente ao total de mutantes equivalentes e q-equivalentes, na oitava e nona coluna são apresentadas as porcentagem de mutantes equivalente e q-equivalentes, respectivamente. Vale ressaltar que, para o

teste de unidade 61 operadores de mutação geraram pelo menos um mutante quando aplicados aos 6 programas utilizados no experimento, assim sendo, por falta de dados estatísticos, 11 operadores não foram avaliados empiricamente, como é o caso do operador OSAA.

Utilizando a mesma terminologia da Tabela 3.20, procurou-se selecionar os 10 operadores de mutação referentes ao teste de unidade que se destacam no número de mutantes gerados, mutantes equivalentes e mutantes q-equivalentes. As Tabelas 3.21 (a), Tabela 3.21 (b) e Tabela 3.21 (c) apresentam esses operadores, respectivamente.

Como pode ser observado nas Tabelas 3.21 (a), (b) e (c), seis operadores se destacam tanto no número de mutantes gerados como na geração de mutantes equivalentes e q-equivalentes como é o caso dos operadores CCCR, CCSR, ORAN, ORRN, VDTR, e VSRR. Considerando que, tanto os mutantes equivalentes como os q-equivalentes não devem ser gerados, deve-se analisar o quanto desses mutantes, somados, os operadores de mutação geram por se tratar dos mutantes mais custosos de serem determinados. Observa-se que, o operador VDTR gera o maior número de mutantes equivalentes e q-equivalentes somados (34,50%) e ainda é responsável por gerar 4,27% do total de mutantes. Por este fator, os mutantes gerados por esse operador de mutação são fortes candidatos a serem identificados como equivalentes ou q-equivalentes. Outro operador que se destaca na geração de mutantes equivalentes e q-equivalentes é o operador CCCR que tem 34,45% de seus mutantes como equivalentes ou q-equivalentes e ainda é responsável por gerar 8,35% do total de mutantes. O contrário ocorre com o operador VPRR, no qual é responsável por gerar 10,64% do total de mutantes, porém não gera uma quantidade significativa de mutantes equivalentes nem q-equivalentes, 0,163% e 0,82%, respectivamente.

Tabela 3.20: Complexidade dos Operadores de Mutação: Ferramenta *Proteum*

Operadores	Mutantes Gerados	Porcentagem de Mutantes Gerados	Mutantes Equivivalentes	Mutantes Q-Equivivalentes	Porcentagem de Equivivalentes	Porcentagem de Q-Equivivalentes	Porcentagem de Equiv./Total de Equiv.	Porcentagem de Q-Equiv./Total de Equiv.
Ccsr	481	8,35%	23	91	4,78%	18,92%	7,26%	27,19%
Ccsr	489	8,49%	12	24	2,45%	4,91%	3,78%	7,17%
CRCR	295	5,12%	10	11	3,39%	3,77%	3,15%	3,29%
OAAA	12	0,21%	0	1	0,00%	8,33%	0,00%	0,30%
OAAAN	60	1,04%	1	3	1,67%	5,00%	0,32%	0,90%
OABA	8	0,14%	0	1	0,00%	12,50%	0,00%	0,30%
OABN	40	0,69%	2	3	5,00%	7,50%	0,63%	0,90%
OAEA	3	0,05%	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
OALN	31	0,54%	0	1	0,00%	3,23%	0,00%	0,30%
OAPN	92	1,60%	0	5	0,00%	5,43%	0,00%	1,49%
OASA	5	0,09%	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
OASN	27	0,47%	0	1	0,00%	3,70%	0,00%	0,30%
OBAA	2	0,03%	0	1	0,00%	50,00%	0,00%	0,30%
OBAN	16	0,28%	1	3	6,25%	18,75%	0,32%	0,90%
OBBA	1	0,02%	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
OBBN	6	0,10%	0	1	0,00%	16,67%	0,00%	0,30%
OBBA	0	0,00%	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
OBBLN	6	0,10%	1	1	16,67%	16,67%	0,32%	0,30%
OBNG	10	0,17%	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
OBRN	19	0,33%	0	3	0,00%	15,79%	0,00%	0,90%
OBSA	1	0,02%	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
OBSN	6	0,10%	0	1	0,00%	16,67%	0,00%	0,30%
OCNG	45	0,78%	0	1	0,00%	2,22%	0,00%	0,30%
OCOR	12	0,21%	0	12	0,00%	100,00%	0,00%	3,59%
OEAA	129	2,24%	14	9	10,85%	6,98%	4,41%	2,69%
OEBB	78	1,35%	19	7	24,36%	8,97%	5,99%	2,09%
OESA	52	0,90%	0	4	0,00%	7,69%	0,00%	1,20%
Oido	39	0,68%	1	2	2,56%	5,13%	0,32%	0,60%
OIPM	4	0,07%	1	2	25,00%	50,00%	0,32%	0,60%
OLAN	53	0,92%	10	2	18,87%	3,77%	3,15%	0,60%
OLBN	32	0,56%	9	1	28,13%	3,13%	2,84%	0,30%
OLLN	11	0,19%	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
OLNG	32	0,56%	0	1	0,00%	3,13%	0,00%	0,30%

Tabela 3.20: Complexidade dos Operadores de Mutação: Ferramenta *Proteum* (Continuação...)

Operadores	Mutantes Gerados	Porcentagem de Mutantes Gerados	Mutantes Equivalentes	Mutantes Q-Equivalentes	Porcentagem de Equivalentes	Porcentagem de Q-Equivalentes	Porcentagem de Equiv./Total de Equiv.	Porcentagem de Q-Equiv./Total de Equiv.
OLRN	63	1,09%	2	2	3,18%	3,17%	0,63%	0,60%
OLSN	21	0,36%	1	1	4,76%	4,76%	0,32%	0,30%
ORAN	185	3,21%	20	9	10,81%	4,86%	6,30%	2,69%
ORBN	106	1,84%	14	6	13,21%	5,66%	4,41%	1,79%
ORLN	86	1,49%	6	7	6,98%	8,14%	1,89%	2,09%
ORRN	214	3,71%	22	14	10,28%	6,54%	6,93%	4,18%
ORSN	71	1,23%	11	4	15,49%	5,63%	3,47%	1,20%
OSAA	0	0,00%	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
OSAN	0	0,00%	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
OSBA	0	0,00%	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
OSBN	0	0,00%	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
OSEA	0	0,00%	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
OSLN	0	0,00%	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
OSRN	0	0,00%	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
OSSN	0	0,00%	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
OSSA	0	0,00%	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
SBRC	2	0,03%	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
SBRn	2	0,03%	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
SCRB	5	0,09%	2	0	0,00%	0,00%	0,63%	0,00%
SCRn	2	0,03%	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
SDWD	1	0,02%	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
SGLR	1	0,02%	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
SMIC	14	0,24%	1	1	0,14%	7,14%	0,32%	0,30%
SMIT	14	0,24%	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
SMVB	12	0,21%	1	1	8,33%	8,33%	0,32%	0,30%
SRSR	280	4,86%	2	4	0,71%	1,43%	0,63%	1,20%
SSDL	166	2,88%	4	8	2,41%	4,82%	1,26%	2,39%
SSWM	7	0,12%	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
STRI	61	1,06%	1	1	1,64%	1,64%	0,32%	0,30%
STRP	167	2,90%	1	1	0,60%	0,60%	0,32%	0,30%
SWDD	8	0,14%	1	0	12,50%	0,00%	0,32%	0,00%
Varr	48	0,83%	1	0	2,08%	0,00%	0,32%	0,00%

Tabela 3.20: Complexidade dos Operadores de Mutação: Ferramenta *Protein* (Continuação...)

Operadores	Mutantes Gerados	Porcentagem de Mutantes Gerados	Mutantes Equivalentes	Mutantes Q-Equivalentes	Porcentagem de Equivalentes	Porcentagem de Q-Equivalentes	Porcentagem de Equiv./Total de Equiv.	Porcentagem de Q-Equiv./Total de Equiv.
VDTR	246	4,27%	100	10	40,65%	4,07%	31,51%	2,99%
Vprr	613	10,64%	1	5	0,16%	0,82%	0,32%	1,49%
VSCR	26	0,45%	1	2	3,85%	7,69%	0,32%	0,60%
Vsrr	1199	20,81%	16	60	1,33%	5,00%	5,04%	17,93%
Vitr	3	0,05%	0	1	0,00%	33,33%	0,00%	0,30%
VTWD	164	2,85%	6	10	3,66%	6,10%	1,89%	2,99%

Tabela 3.21: Operadores de Mutação de Unidade mais Custosos: (a) Mutantes Gerados, (b) Mutantes Equivalentes e (c) Mutantes Q-Equivalentes

Operadores	Porcentagem de Mutantes Gerados	Porcentagem de Equiv./Total de Equiv.	Porcentagem de Q-Equiv./Total de Equiv.
Vsrr	20,81%	5,04%	17,93%
Vprr	10,64%	0,32%	1,49%
Ccsr	8,49%	3,78%	7,17%
Ccer	8,35%	7,25%	27,19%
CRCR	5,12%	3,15%	3,29%
SRSR	4,86%	0,63%	1,20%
VDTR	4,27%	31,51%	2,99%
ORRN	3,71%	6,93%	4,18%
ORAN	3,21%	6,30%	2,69%
STRP	2,90%	0,32%	0,30%

(a)

Operadores	Porcentagem de Mutantes Gerados	Porcentagem de Equiv./Total de Equiv.	Porcentagem de Q-Equiv./Total de Equiv.
VDTR	4,27%	31,51%	2,99%
Ccer	8,35%	7,25%	27,19%
ORRN	3,71%	6,93%	4,18%
ORAN	3,21%	6,30%	2,69%
OEBA	1,35%	5,99%	2,09%
Vsrr	20,81%	5,04%	17,93%
OEAA	2,24%	4,41%	2,69%
ORBN	1,84%	4,41%	1,79%
Ccsr	8,49%	3,78%	7,17%
ORSN	1,23%	3,47%	1,20%

(b)

Operadores	Porcentagem de Mutantes Gerados	Porcentagem de Equiv./Total de Equiv.	Porcentagem de Q-Equiv./Total de Equiv.
Ccer	8,35%	7,26%	27,19%
Vsrr	20,81%	5,04%	17,93%
Ccsr	8,49%	3,78%	7,17%
ORRN	3,71%	6,93%	4,18%
OCOR	0,21%	0,00%	3,59%
CRCR	5,12%	3,15%	3,29%
VDTR	4,27%	31,51%	2,99%
VTWD	2,85%	1,89%	2,99%
OEAA	2,24%	4,41%	2,69%
ORAN	3,21%	6,30%	2,69%

(c)

A seguir a mesma análise teórica e empírica que é aplicada nos operadores de mutação de unidade é aplicada sobre os operadores de mutação para o teste de integração.

3.3.2 Operadores de Mutação para o Teste de Integração

DirVarAriNeg - Inserts Arithmetic Negation at Interface Variable (Grupo I)

Descrição:

Este operador inclui o operador de negação aritmética (-) em cada referência a variáveis de interface.

Exemplos:

```
int nfiles[];

skip(int i; int vet[]) {
    int x;
    for(x=1; x<=i;x++)
        nfiles[x] = vet[x];
}
```

Programa Original

```
int nfiles[];

skip(int i; int vet[]) {
    int x;
    for(x=1; IF_MUTA(x<=-i, x<=i) ;x++)
        nfiles[x] = vet[x];
}
```

Mutante 1

```
int nfiles[];

skip(int i; int vet[]) {
    int x;
    for(x=1; x<=i;x++)
        IF_MUTA(nfiles[x]==-vet[x] ;, nfiles[x]=vet[x];)
}
```

Mutante 2

Informações Estatísticas:

Mutantes Gerados	Mutantes Equiv.	Mutantes Q-Equiv.	Mutantes Mortos	Mortos			
Stdout	Retcode	Timeout	Trap				
1,04%	43,33%	6,67%	51,00%	85,17%	13,74%	1,10%	0,00%

Casos de Teste Habilitados									
10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
47,80%	23,08%	8,24%	3,30%	2,20%	3,84%	0,55%	4,40%	4,39%	2,20%

Porcentagem de Casos de Teste (Índice de Mortalidade dos Mutantes)									
[0-10]	(10-20]	(20-30]	(30-40]	(40-50]	(50-60]	(60-70]	(70-80]	(80-90]	(90-100]
16,48%	12,09%	17,03%	10,99%	10,99%	12,09%	7,14%	6,04%	1,10%	6,04%

Informações Sobre Equivalência:

O testador deve verificar se as variáveis que estão sofrendo a mutação não estão sendo utilizadas em operações lógicas (&&, || e !) pois, caso isso esteja acontecendo, os mutantes sempre serão equivalentes. Isso se deve ao fato de que, na linguagem C, todos valores diferentes de zero são verdadeiros não importando se esses valores são positivos ou negativos. Pelo fato do programa sort utilizar variáveis em comparações lógicas, alguns mutantes gerados pela aplicação desse operador possuem essa característica, contribuindo para o aumento do número de mutantes equivalentes (43,33%).

ArgRepReq - Replaces Arguments by Set R (Grupo II)**Descrição:**

Este operador troca os argumentos por constantes, de tipos compatíveis, pertencentes ao conjunto de constantes requeridas (conjunto *R*).

Exemplos:

```
int verificamês() {  
    int c, d;  
    c = 1;  
    d = v(c,total);  
    return d;  
}
```

Programa Original

```
int verificamês() {  
    int c, d;  
    c = 1;  
    d = v(MAXINT,total);  
    return d;  
}
```

Mutante 1

```
int verificamês() {  
    int c, d;  
    c = 1;  
    d = v(MININT,total);  
    return d;  
}
```

Mutante 2

```

int verificamês() {
    int c, d;
    c = 1;
    d = v(0,total);
    return d;
}

```

Mutante 3

```

int verificamês() {
    int c, d;
    c = 1;
    d = v(1,total);
    return d;
}

```

Mutante 4

```

int verificamês() {
    int c, d;
    c = 1;
    d = v(-1,total);
    return d;
}

```

Mutante 5

Informações Estatísticas:

Mutantes Gerados	Mutantes Equiv.	Mutantes Q-Equiv.	Mutantes Mortos	Mortos			
Stdout	Retcode	Timeout	Trap				
0,31%	5,56%	0,00%	94,44%	80,20%	16,83%	2,97%	0,00%

Casos de Teste Habilitados									
10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
73,27%	24,75%	1,98%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Porcentagem de Casos de Teste (Índice de Mortalidade dos Mutantes)									
[0-10]	(10-20]	(20-30]	(30-40]	(40-50]	(50-60]	(60-70]	(70-80]	(80-90]	(90-100]
10,89%	9,90%	29,70%	0,00%	4,95%	14,85%	4,95%	9,90%	0,00%	14,85%

Ao contrário do que aconteceu para o teste de unidade, no teste de integração, todos os operadores de mutação geram pelo menos um mutante quando aplicados aos 6 programas utilizados no experimento como pode ser observado na Tabela 3.22.

Tabela 3.22: Complexidade dos Operadores de Mutação: Ferramenta PROTEUM

Operadores	Mutantes Gerados	Porcentagem de Mutantes Gerados	Mutantes Equivalentes	Mutantes Q-Equivalentes	Porcentagem de Equivalentes	Porcentagem de Q-Equivalentes	Porcentagem de Equiv./Total de Equiv.	Porcentagem de Q-Equiv./Total de Equiv.
I-CovAllEdg	138	2,39%	11	1	7,97%	0,72%	0,94%	0,45%
I-CovAllNod	151	2,62%	9	1	5,96%	0,66%	0,77%	0,45%
I-DirVarAriNeg	60	1,04%	26	4	43,33%	6,67%	2,23%	1,79%
I-DirVarBitNeg	60	1,04%	13	5	21,67%	8,33%	1,12%	2,24%
I-DirVarIncDec	225	3,90%	34	10	15,11%	4,44%	2,92%	4,48%
I-DirVarLogNeg	60	1,04%	14	3	23,33%	5,00%	1,20%	1,34%
I-DirVarRepCon	413	7,17%	74	20	17,92%	4,84%	6,35%	8,95%
I-DirVarRepExt	676	11,73%	204	24	30,18%	3,55%	17,52%	10,75%
I-DirVarRepGlo	124	2,15%	40	7	32,26%	5,65%	3,43%	3,13%
I-DirVarRepLoc	185	3,21%	22	5	11,89%	2,70%	1,89%	2,24%
I-DirVarRepPar	109	1,89%	14	5	12,84%	4,59%	1,20%	2,24%
I-DirVarRepReq	299	5,19%	74	15	24,75%	5,02%	6,35%	6,72%
I-IndVarAriNeg	101	1,75%	44	4	43,56%	3,96%	3,78%	1,79%
I-IndVarBitNeg	101	1,75%	17	5	16,83%	4,95%	1,46%	2,24%
I-IndVarIncDec	245	4,25%	39	7	15,92%	2,86%	3,35%	3,13%
I-IndVarLogNeg	101	1,75%	19	3	18,81%	2,97%	1,63%	1,34%
I-IndVarRepCon	673	11,68%	113	22	16,79%	3,27%	9,70%	9,85%
I-IndVarRepExt	666	11,56%	170	19	25,53%	2,85%	14,60%	8,51%
I-IndVarRepGlo	225	3,90%	56	12	24,89%	5,33%	4,81%	5,37%
I-IndVarRepLoc	248	4,30%	33	15	13,31%	6,05%	2,83%	6,72%
I-IndVarRepPar	208	3,61%	33	7	15,87%	3,37%	2,83%	3,13%
I-IndVarRepReq	458	7,95%	89	22	19,43%	4,80%	7,64%	9,85%
I-RetStaDel	17	0,29%	4	1	23,53%	5,88%	0,34%	0,45%
I-RetStaRep	15	0,26%	4	0	26,67%	0,00%	0,34%	0,00%
II-ArgAriNeg	7	0,12%	1	0	14,29%	0,00%	0,09%	0,00%
II-ArgBitNeg	7	0,12%	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
II-ArgDel	21	0,36%	1	0	4,76%	0,00%	0,09%	0,00%
II-ArgIncDec	54	0,94%	4	2	7,41%	3,70%	0,34%	0,90%
II-ArgLogNeg	7	0,12%	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
II-ArgRepReq	18	0,31%	1	0	5,56%	0,00%	0,09%	0,00%
II-ArgStcAli	6	0,10%	1	1	16,67%	16,67%	0,09%	0,45%
II-ArgStcDif	8	0,14%	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
II-FunCalDel	76	1,32%	5	5	6,58%	6,58%	0,43%	2,24%

A partir da Tabela 3.22 foram determinados quais os 10 operadores de mutação, referentes ao teste de integração, que se destacam na quantidade de mutantes gerados, mutantes equivalentes e mutantes q-equivalentes. As Tabela 3.23 (a), Tabela 3.23 (b) e Tabela 3.23 (c) apresentam esse operadores, respectivamente.

Tabela 3.23: Operadores de Mutação de Interface mais Custosos: (a) Mutantes Gerados, (b) Mutantes Equivalentes e (c) Mutantes Q-Equivalentes

Operadores	Porcentagem de Mutantes Gerados	Porcentagem de Equiv./Total de Equiv.	Porcentagem de Q-Equiv./Total de Equiv.
I-DirVarRepExt	11,73%	17,52%	10,75%
I-IndVarRepCon	11,68%	9,70%	9,85%
I-IndVarRepExt	11,56%	14,60%	8,51%
I-IndVarRepReq	7,95%	7,64%	9,85%
I-DirVarRepCon	7,17%	6,35%	8,95%
I-DirVarRepReq	5,19%	6,35%	6,72%
I-IndVarRepLoc	4,30%	2,83%	6,72%
I-IndVarIncDec	4,25%	3,35%	3,13%
I-IndVarRepGlo	3,90%	4,81%	5,37%
I-DirVarIncDec	3,90%	2,92%	4,48%

(a)

Operadores	Porcentagem de Mutantes Gerados	Porcentagem de Equiv./Total de Equiv.	Porcentagem de Q-Equiv./Total de Equiv.
I-DirVarRepExt	11,73%	17,52%	10,75%
I-IndVarRepExt	11,56%	14,60%	8,51%
I-IndVarRepCon	11,68%	9,70%	9,85%
I-IndVarRepReq	7,95%	7,64%	9,85%
I-DirVarRepCon	7,17%	6,35%	8,95%
I-DirVarRepReq	5,19%	6,35%	6,72%
I-IndVarRepGlo	3,90%	4,81%	5,37%
I-IndVarAriNeg	1,75%	3,78%	1,79%
I-DirVarRepGlo	2,15%	3,43%	3,13%
I-IndVarIncDec	4,25%	3,35%	3,13%

(b)

Operadores	Porcentagem de Mutantes Gerados	Porcentagem de Equiv./Total de Equiv.	Porcentagem de Q-Equiv./Total de Equiv.
I-DirVarRepExt	11,73%	17,52%	10,75%
I-IndVarRepCon	11,68%	9,70%	9,85%
I-IndVarRepReq	7,95%	7,64%	9,85%
I-DirVarRepCon	7,17%	6,35%	8,95%
I-IndVarRepExt	11,56%	14,60%	8,51%
I-DirVarRepReq	5,19%	6,35%	6,72%
I-IndVarRepLoc	4,30%	2,83%	6,72%
I-IndVarRepGlo	3,90%	4,81%	5,37%
I-DirVarIncDec	3,90%	2,92%	4,48%
I-DirVarRepGlo	2,15%	3,43%	3,13%

(c)

Observa-se na Tabela 3.23 que, sete operadores se destacam tanto no número de mutantes gerados como na geração de mutantes equivalentes e q-equivalentes como é o caso dos operadores DirVarRepCon, DirVarRepExt, DirVarRepReq, IndVarRepCon, IndVarRepExt, IndVarRepGlo e IndVarRepReq. Um desses operadores é o operador DirVarRepExt que gera o maior número de mutantes (11,73%), mutantes equivalentes (17,52%)

e mutantes q-equivalentes (10,75%). O mesmo destaque é dado ao operador *IndVarRepCon* pois, apesar de ser o terceiro operador que mais gera mutantes equivalentes (9,70%) é o segundo que gera o maior número de mutantes (11,68%) e mutantes q-equivalentes (9,85%).

Conclui-se que, a maioria dos operadores que geram grande número de mutantes também são responsáveis por gerarem grande número de mutantes equivalentes e q-equivalentes, porém, isso não é uma regra, como é o caso do operador *STRP* que apesar de estar entre os 10 operadores que geram o maior número de mutantes (2,90%), a quantidade de mutantes equivalentes e q-equivalentes gerados com sua aplicação é relativamente baixa, 0,32% e 0,30% respectivamente.

3.4 Considerações Finais

Neste capítulo mostraram-se os resultados da aplicação dos critérios Análise de Mutantes e Mutação de Interface em seis programas selecionados para a aplicação do experimento. Deste experimento foram analisados todos os operadores de mutação definidos e implementados nas ferramentas *Proteum* e *PROTEUM/IM* com o objetivo de fornecer subsídios para reduzir o custo de aplicação dos critérios baseados em mutação por meio da identificação dos operadores de mutação geram o maior número de mutantes equivalentes, q-equivalentes e mutantes que morrem facilmente. Os resultados se mostraram promissores pois, a partir deles foram identificadas heurísticas para determinação de mutantes equivalentes que facilitará a vida do testador na fase de análise dos mutantes vivos, uma vez que essa atividade é feita manualmente, sendo a mais custosa quando aplicado o Teste de Mutação.

Com base nos dados estatísticos obtidos com a aplicação do experimento, pode-se criar alternativas para a aplicação dos operadores de mutação por meio da seleção de subconjuntos desses operadores, reduzindo o custo de aplicação dos critérios, sem comprometer a qualidade da atividade de teste. A seguir é apresentado uma dessas alternativas para aplicação dos operadores de mutação, utilizando os dados estatísticos obtidos nesse capítulo.

Estabelecimento de Estratégias de Teste para Aplicação dos Operadores de Mutação

COMO pode ser visto Capítulo 3, o número de mutantes gerados tanto para o critério Análise de Mutantes como para o critério Mutação de Interface é grande, mesmo para programa simples (vide Tabelas 3.11 e 3.12), fortalecendo o interesse de investigar mecanismos para redução do custo de aplicação dos critérios.

Para o estabelecimento de estratégias de teste para aplicação dos operadores de mutação, os critérios Análise de Mutantes e Mutação de Interface são analisados separadamente. A idéia é minimizar o custo de aplicação desses critérios, visando a estabelecer um modo incremental para aplicação dos operadores de mutação reduzindo o custo do teste de unidade e de integração.

Tendo um conjunto de operadores de mutação, a questão que se coloca é: “Como selecionar um subconjunto de operadores que conduzam a conjuntos de teste adequados ou próximos da adequação em relação ao conjunto total de mutantes, reduzindo o custo tanto em termos do número de mutantes gerados quanto do número de mutantes equivalentes?”. Procurando responder a essa questão, alguns estudos teóricos (Barbosa, 1998; Vincenzi, 1998) e empíricos (Vincenzi et al., 2001) foram aplicados. Porém, os mesmos não consideravam o número de mutantes equivalentes gerado pelos operadores. Neste capítulo é descrito um experimento que visa a avaliar os critérios Análise de Mutantes e Mutação de Interface com o objetivo de sele-

cionar um subconjunto de operadores de mutação levando em consideração informações sobre equivalência.

4.1 Descrição do Experimento

A metodologia usada na condução deste experimento foi a mesma utilizada no experimento apresentado no Capítulo 3 e compreende quatro passos: seleção dos Programas, seleção das ferramentas, geração dos casos de teste, coleta e Análise dos dados.

Este experimento foi conduzido a partir dos mesmo cinco programas utilizados no experimento do Capítulo 3, (Cal, Checkeq, Comm, Look e Uniq), por possuírem 11 sessões de teste para cada programa tanto para o critério Análise de Mutantes como para o critério Mutação de Interface. Neste capítulo, para referenciarmos esse conjunto de 5 programas, utilizaremos a nomenclatura 5-UNIX. As ferramentas utilizadas para aplicação do experimento foram as mesmas utilizadas no experimento anterior, a *Proteum* e a *PROTEUM/IM*. Os conjuntos de casos de teste utilizados também foram os mesmos utilizados no experimento anterior (Seção 3.2.3).

Os dados coletados e a análise sobre eles aplicada são descritos a seguir.

4.1.1 Coleta e Análise dos Dados

Para se estabelecer uma estratégia incremental de aplicação dos operadores de mutação, é preciso definir como classificá-los, por exemplo: por custo (número de mutantes gerados), por *strength* relativo, por eficácia, por número de mutantes equivalentes, por dificuldade de se matar os mutantes ou por uma combinação desses aspectos. No trabalho desenvolvido por Vincenzi et al. (2001) foi utilizada uma classificação baseada no escore de mutação e no custo em termos do número de mutantes gerados. Este trabalho utiliza outra abordagem na qual o custo em termos do número de mutantes equivalentes e a dificuldade em distinguir os mutantes também é considerado. As estratégias aqui apresentadas classificam os operadores de mutação de acordo com o *strength* relativo, o número de mutantes equivalentes, custo de cada operador em relação ao número de mutantes gerados e a dificuldade de se distinguir mutantes de um determinado operador.

Sabe-se que, em geral, independentemente da qualidade dos conjuntos de casos de teste utilizados, 80% dos mutantes gerados morrem na primeira execução (Budd et al., 1980). Assim sendo, em torno de 20% dos mutantes gerados são os que contribuem efetivamente para a eficácia do critério. Procurou-se estabelecer uma ordenação parcial entre os operadores de mutação de modo que os operadores que geram mutantes difíceis de matar fossem aplicados primeiro.

Para isso, uma informação fundamental é a quantidade de mutantes que são mortos por uma determinada quantidade de casos de teste, identificando os operadores que produzem mutantes

difíceis de serem mortos. Considera-se que, um mutante é difícil de ser morto quando apenas uma pequena porcentagem dos casos de teste é capaz de distinguir seu comportamento do programa original. Para isso avaliou-se qual a relação entre o número de casos de teste executados e a porcentagem de mutantes mortos. A Tabela 4.1 apresenta parte desta informação coletada para um dos conjuntos de casos de teste AM-adequados do programa Cal. Por exemplo, considerando o operador CCCR, 14,83% dos mutantes mortos podem ser considerados difíceis de serem distinguidos pois, do conjunto de teste utilizado, no máximo 10% dos casos de teste são capazes de distinguir tais mutantes. Observa-se ainda que, no caso desse mesmo operador, 0,11% de seus mutantes morrem facilmente quando executados com qualquer caso de teste ((90% à 100%] dos casos de teste). Já para o operador VSCR (última linha), 100% de seus mutantes são considerados difíceis de serem mortos caracterizando esse operador como um operador que gera mutantes mais difíceis de serem distinguidos do que os mutantes gerados pelo operador CCCR.

Tabela 4.1: Porcentagem de Casos de Teste Necessárias para Matar os Mutantes de cada Operador para um conjunto AM-adequado: Programa Cal

Oper	Porcentagem de Casos de Teste (Índice de Mortalidade dos Mutantes)									
	[0-10]	(10-20]	(20-30]	(30-40]	(40-50]	(50-60]	(60-70]	(70-80]	(80-90]	(90-100]
CCCR	14,83%	11,38%	33,91%	14,37%	8,51%	5,17%	11,72%	0,00%	0,00%	0,11%
Ccsr	20,37%	1,56%	32,50%	11,35%	11,20%	5,75%	17,26%	0,00%	0,00%	0,00%
CRCR	15,90%	0,00%	30,26%	9,74%	10,26%	7,18%	26,67%	0,00%	0,00%	0,00%
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
OABA	20,00%	10,00%	40,00%	10,00%	3,33%	10,00%	6,67%	0,00%	0,00%	0,00%
OAEA	20,00%	0,00%	50,00%	10,00%	0,00%	10,00%	10,00%	0,00%	0,00%	0,00%
OBBN	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
SCRn	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
SMTC	0,00%	0,00%	37,50%	12,50%	0,00%	12,50%	37,50%	0,00%	0,00%	0,00%
SRSR	9,47%	8,42%	21,05%	5,26%	10,53%	5,26%	37,89%	0,00%	0,00%	2,11%
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Varr	14,81%	7,41%	40,74%	18,52%	5,56%	3,70%	9,26%	0,00%	0,00%	0,00%
VDTR	9,30%	1,16%	32,56%	15,12%	2,33%	5,81%	32,56%	0,00%	0,00%	1,16%
VSCR	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

A Tabela 4.1 foi gerada 11 vezes para cada programa e critério, correspondendo aos 11 conjuntos de casos de teste AM-adequados e MI-adequados. Em seguida foi gerada a Tabela 4.2 contendo a média obtida para os 11 conjuntos de casos de teste existentes para cada programa.

Desse modo, considerando-se que para o estabelecimento das estratégias foram utilizados cinco programas, cinco tabelas sintetizando os resultados de cada programa foram geradas e a Tabela 4.3 apresenta a média obtida para os cinco programas.

Desse modo, utilizando tal informação, é possível classificar os operadores de mutação priorizando a aplicação daqueles que geram os mutantes mais difíceis de serem mortos pois, os casos de teste capazes de distinguir tais mutantes provavelmente serão capazes de distinguir mutantes gerados por outros operadores. Porém, existem casos nos quais a distribuição de porcentagem de mutantes mortos não é trivial. Por exemplo, caso um operador tenha 50% dos

Tabela 4.2: Média para os 11 conjuntos AM-adequados: Programa Cal

Oper	Porcentagem de Casos de Teste (Índice de Mortalidade dos Mutantes)									
	[0-10]	(10-20]	(20-30]	(30-40]	(40-50]	(50-60]	(60-70]	(70-80]	(80-90]	(90-100]
Cccr	15,31%	12,61%	20,68%	24,45%	9,09%	5,14%	12,46%	0,15%	0,00%	0,11%
Ccsr	20,37%	2,77%	20,54%	21,65%	10,26%	7,57%	16,80%	0,05%	0,00%	0,00%
CRCR	15,90%	1,18%	19,79%	19,03%	9,79%	8,26%	25,95%	0,15%	0,00%	0,00%
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
OABA	20,67%	10,67%	26,67%	20,00%	5,67%	9,33%	7,00%	0,00%	0,00%	0,00%
OAEA	20,00%	6,00%	30,00%	22,00%	6,00%	6,00%	10,00%	0,00%	0,00%	0,00%
OBBN	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
SCRn	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
SMTC	0,00%	0,00%	21,25%	26,25%	10,00%	5,00%	37,50%	0,00%	0,00%	0,00%
SRSR	10,21%	7,68%	13,16%	16,21%	7,26%	4,53%	38,42%	0,42%	0,00%	2,11%
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Varr	15,93%	6,48%	23,70%	31,48%	9,26%	3,89%	9,26%	0,00%	0,00%	0,00%
VDTR	9,77%	0,70%	20,23%	24,77%	4,42%	4,88%	33,95%	0,12%	0,00%	1,16%
VSCR	99,33%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Tabela 4.3: Média da Porcentagem de Casos de Teste Necessárias para Matar os Mutantes de cada Operador: 5 Programas

Oper	Porcentagem de Casos de Teste (Índice de Mortalidade dos Mutantes)									
	[0-10]	(10-20]	(20-30]	(30-40]	(40-50]	(50-60]	(60-70]	(70-80]	(80-90]	(90-100]
Cccr	15,76%	11,03%	26,59%	14,97%	12,34%	4,40%	8,73%	4,20%	0,66%	1,31%
Ccsr	17,71%	8,14%	28,80%	14,90%	10,01%	5,11%	8,78%	4,68%	0,58%	1,30%
CRCR	13,69%	8,32%	25,50%	15,44%	9,26%	8,59%	10,87%	5,50%	1,48%	1,34%
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
OABA	17,14%	8,57%	37,14%	11,43%	2,86%	11,43%	5,71%	0,00%	2,86%	2,86%
OAEA	16,67%	0,00%	41,67%	16,67%	8,33%	8,33%	8,33%	0,00%	0,00%	0,00%
OBBN	42,86%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	57,14%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
SCRn	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
SMTC	18,75%	12,50%	25,00%	6,25%	6,25%	12,50%	18,75%	0,00%	0,00%	0,00%
SRSR	9,76%	7,16%	16,49%	18,00%	12,15%	12,58%	14,75%	6,72%	0,43%	1,95%
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Varr	12,65%	7,83%	27,71%	20,48%	13,25%	8,43%	4,22%	5,42%	0,00%	0,00%
VDTR	14,60%	6,21%	20,81%	14,29%	4,97%	6,83%	13,66%	7,76%	4,35%	6,52%
VSCR	43,90%	2,44%	4,88%	7,32%	2,44%	17,07%	7,32%	9,76%	0,00%	4,8%

seus mutantes mortos classificados na primeira coluna ([0-10]) e os outros 50% na última coluna ([90-100]), e um outro operador tenha 40% dos seus mutantes na primeira coluna e o restante (60%) na segunda coluna ([10-20]), qual desses operadores de mutação geram mutantes mais difíceis de serem mortos? Uma alternativa para responder essa pergunta é utilizar um modelo estatístico, no caso, o modelo adotado foi o modelo de ordem estocástica descrito a seguir.

4.1.2 Modelo de Ordem Estocástica

Nesta seção é apresentado o modelo estatístico utilizado para ordenar os operadores de mutação com relação a geração de mutantes mais difíceis de serem mortos. Na Tabela 4.4 é apresentada a nomenclatura utilizada para definição desse modelo estatístico que está descrito em (McCullagh & Nelder, 1990), onde:

- y_{ij} : representa a quantidade de mutantes do operador i que estão na categoria $A1, A2, \dots, A_n$ (Tabela 4.4); e

$$i = 1, \dots, n \quad \text{e} \quad j = 1, \dots, k$$

- m_i : representa a quantidade de mutantes gerados pelo operador i .

Tabela 4.4: Definições para Aplicação do Algoritmo

Operadores	Categorias						Mutantes
	A1	A2	A3	A4	...	An	
1	y_{11}	y_{12}	y_{13}	y_{14}	...	y_{1k}	m_1
2	y_{21}	y_{22}	y_{23}	y_{24}	...	y_{2k}	m_2
...	...	...	...	...	...	...	...
n	y_{n1}	y_{n2}	y_{n3}	y_{n4}	...	y_{nk}	m_k

Considere:

π_{ij} : probabilidade de um mutante do operador i estar na categoria j .

$$\gamma_{ij} = \pi_{i1} + \pi_{i2} + \dots + \pi_{ij}$$

γ_{ij} : é a probabilidade do mutante ser detectado até a categoria j , ou seja, será o somatório da probabilidade desse mutante estar na primeira categoria (π_{i1}) até a categoria j (π_{ij}).

Neste caso, temos o seguinte modelo logístico linear:

$$\log \frac{\gamma_{ij}}{1 - \gamma_{ij}} = \Theta_j + \beta_i \quad (4.1)$$

O modelo logístico 4.1 nos dá a relação entre a probabilidade acumulada e os parâmetros Θ_j e β_i onde Θ_j está relacionado com o categoria e β_i está relacionado como operador de mutação.

Os parâmetros Θ_j tem pouco interesse e são conhecidos como “cut points” no modelo logístico. O parâmetro da regressão β_i descreve como o log “odds” está relacionado com os operadores (covariáveis). Se tomarmos, como exemplo, dois operadores i_1 e i_2 , obtemos que:

$$\log \frac{\gamma_{i_1 j}}{1 - \gamma_{i_1 j}} - \log \frac{\gamma_{i_2 j}}{1 - \gamma_{i_2 j}} = \beta_{i_1} - \beta_{i_2} = \Delta$$

Desde que, a função logística é monótona crescente, obtemos que:

$$\gamma_{i_1 j} > \gamma_{i_2 j} \quad \text{para} \quad \Delta > 0 \quad (\beta_{i_1} > \beta_{i_2})$$

$$\gamma_{i_1 j} < \gamma_{i_2 j} \quad \text{para} \quad \Delta < 0 \quad (\beta_{i_1} < \beta_{i_2})$$

Desta forma, quanto maior o β_i mais mutantes do operador i estão nas categorias iniciais, tornando os mutantes desse operador mais difíceis de serem mortos.

Estimador da Máxima Verossimilhança

O método da máxima verossimilhança é um procedimento geral para obtermos estimativas (aproximações) de parâmetros desconhecidos no nosso modelo.

Ao propormos o modelo logístico (Equação 4.1) temos como parâmetros as constantes θ_j e β_i ($j = 1, \dots, k$ e $i = 1, \dots, n$). Diferentes métodos podem ser utilizados para estimar (aproximar) os valores destes parâmetros, sendo que cada método utiliza uma avaliação apropriada. No método da máxima verossimilhança a função de avaliação é definida pela probabilidade do operador i apresentar y_{i1} mutantes na categoria A_1 , y_{i2} mutantes na categoria A_2 e assim por diante. Esta função de avaliação é denominada verossimilhança. Aqui, queremos encontrar os estimadores (função dos dados) que maximizam a verossimilhança.

A seguir, vamos descrever a verossimilhança via a distribuição multinomial. Esta distribuição descreve a probabilidade do operador i ($i = 1, \dots, n$) apresentar y_{ij} mutantes na categoria j para ($j = 1, \dots, k$). Para maximizar a verossimilhança, vamos derivá-la e igualá-la a zero. A fim de determinarmos o zero da derivada da verossimilhança, utilizamos o método de Newton-Raphson (McCullagh & Nelder, 1990) modificado apresentado na Seção 4.1.2.1.

Distribuição Multinomial

$$y_i = (y_{i1}, \dots, y_{ik}) \quad e$$

$$P[Y_{i1} = y_{i1}; \dots; Y_{ik} = y_{ik}] = \frac{m_i!}{y_{i1}! \dots y_{ik}!} (\pi_{i1})^{y_{i1}} \dots (\pi_{ik})^{y_{ik}} \quad \text{onde } i = 1, \dots, n$$

A contribuição da distribuição multinomial Y_i para a função da verossimilhança é dada por:

$$(\pi_{i1})^{y_{i1}} \dots (\pi_{ik})^{y_{ik}}$$

Como estamos lidando com as probabilidades acumuladas, tomamos:

$$r_{i1} = y_{i1} \quad z_{i1} = \frac{r_{i1}}{m_i}$$

$$r_{i2} = y_{i1} + y_{i2} \quad z_{i2} = \frac{r_{i2}}{m_i}$$

⋮

$$r_{ik} = y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{ik} \quad z_{ik} = \frac{r_{ik}}{m_i}$$

Assim a função de verossimilhança pode ser escrita, na forma:

$$\left\{ \left(\frac{\gamma_{i1}}{\gamma_{i2}} \right)^{r_{i1}} \left(\frac{\gamma_{i2} - \gamma_{i1}}{\gamma_{i2}} \right)^{r_{i2} - r_{i1}} \right\} * \left\{ \left(\frac{\gamma_{i2}}{\gamma_{i3}} \right)^{r_{i2}} \left(\frac{\gamma_{i3} - \gamma_{i2}}{\gamma_{i3}} \right)^{r_{i3} - r_{i2}} \right\} * \dots$$

$$\dots * \left\{ \left(\frac{\gamma_{i(k-1)}}{\gamma_{ik}} \right)^{r_{i(k-1)}} \left(\frac{\gamma_{ik} - \gamma_{i(k-1)}}{\gamma_{ik}} \right)^{r_{ik} - r_{i(k-1)}} \right\}$$

Se tomarmos,

$$\Phi_{ij} = \log \frac{\gamma_{ij}}{\gamma_{i(j+1)} - \gamma_{ij}} \quad ;$$

$$g[\Phi_{ij}] = \log\{1 + \exp(\Phi_{ij})\} = \log \frac{\gamma_{i(j+1)}}{\gamma_{i(j+1)} - \gamma_{ij}}$$

Então, o log-verossimilhança é dado por:

$$\rho_i = n[(z_{i1} * \Phi_{i1} - z_{i2} * g(\Phi_{i1})) + (z_{i2} \Phi_{i2} - z_{i3} g(\Phi_{i2})) + \dots + (z_{i(k-1)} \Phi_{i(k-1)} - g(\Phi_{i(k-1)}))]$$

4.1.2.1 Algoritmo Matemático de Newton Raphson

Para maximizar a verossimilhança foi aplicado o algoritmo de Newton Raphson (McCullagh, 1989) modificado, utilizando o software estatístico S-Plus¹. As Tabelas 4.5 e 4.6 apresentam a classificação dos operadores após a aplicação do algoritmo proposto onde os operadores foram ordenados de forma decrescente pelo coeficiente β que, como dito anteriormente, quanto maior, mais difícil os mutantes gerados por aquele operador de serem distinguidos. O coeficiente P refere-se ao comportamento do operador em relação ao operador utilizado como ponto de referência, que no caso dos operadores de unidade foi o operador CCCR e para integração foi o operador I-CovAllEdg. Ao estimarmos os parâmetros β_i utilizando um operador i^* como referência, fazemos testes de hipótese entre β_i e β_{i^*} , ou seja, testamos:

$$H_0 : \beta_{i^*} = \beta_i$$

¹S-PLUS é um ambiente integrado (software) para manipulação, cálculo e exibição de dados (Krause & Olson, 2000).

$$H_j : \beta_{i*} \neq \beta_i$$

Se o coeficiente P for “pequeno”, digamos abaixo de 0,05 (5%), rejeitamos a hipótese H_0 , ou seja, existe uma diferença significativa entre estes operadores. Por outro lado, se o coeficiente P for “alto”, digamos acima de 0,05 (5%), não rejeitamos a hipótese H_0 , ou seja, não existe uma diferença significativa entre estes operadores de mutação.

Quanto mais o coeficiente P for próximo de zero, mais parecido o comportamento do operador com o ponto de referência, ou seja, quando maior P maior é a diferença de comportamento do operador em relação ao ponto de referência.

Tabela 4.5: Aplicação do Algoritmo de Newton Raphson: Operadores de Unidade

Operadores	Número de Mutantes	Coefficiente (β)	Coefficiente P	Mutantes Equivalentes	Mutantes Q-Equivalentes
OLSN	54	0,80388	0,001	1	0
OBNG	15	0,70462	0,140	1	0
OBAN	25	0,51712	0,194	0	5
VSCR	43	0,27112	0,331	1	1
OABA	36	0,14162	0,638	1	0
VTWD	422	0,10536	0,286	19	4
OAEA	12	0,07435	0,884	0	0
ORLN	206	0,04295	0,753	18	3
OBBN	10	0,04026	0,952	0	3
OASA	24	0,02625	0,942	0	0
Ccsr	1393	0,02107	0,746	3	1
SMTC	33	0,02105	0,946	1	0
Ccsr	1676	0,00000	0,000	55	98
ORSN	196	-0,02368	0,872	35	3
OLLN	27	-0,03102	0,927	0	0
OAAA	50	-0,05848	0,817	0	0
OABN	123	-0,06369	0,707	6	2
Varr	169	-0,09962	0,487	3	0
...	...	...	...	...	...
Virr	0	-3,00000	0,00	0	0

Com o objetivo de estabelecer uma estratégia de aplicação dos operadores de mutação que se aproxime do resultado ideal, para cada programa deve ser gerada uma tabela contendo as seguintes informações:

- **Operadores:** nome do operador de mutação op_i ; I indica a linha do operador na tabela.
- **Escore de mutação atual (EM):** Em k é o escore de mutação, em relação ao conjunto total de mutantes, obtido pelo conjunto de casos de teste ($T = Top_1 \cup Top_2 \cup \dots \cup Top_{k-1} \cup Top_k$). Top_i denota o conjunto de casos de teste que é adequado ao operador i ;
- **Incremento (Inc):** diferença entre o escore de mutação atual e o anterior ($Inc_i = EM_i - EM_{i-1}$);

Tabela 4.6: Aplicação do Algoritmo de Newton Raphson: Operadores de Interface

Operadores	Número de Mutantes	Coefficiente (β)	Coefficiente P	Mutantes Equivalentes	Mutantes Q-Equivalentes
II-ArgStcDif	43	0,98383	0,001	0	0
I-DirVarRepCon	1380	0,53901	0,000	76	11
I-IndVarRepCon	2555	0,48928	0,000	283	62
II-ArgStcAli	21	0,47070	0,308	3	3
I-DirVarRepLoc	488	0,38730	0,002	29	5
I-DirVarRepPar	385	0,37858	0,004	44	4
II-ArgAriNeg	26	0,37096	0,297	0	0
II-ArgBitNeg	26	0,37096	0,297	0	0
II-ArgLogNeg	26	0,37096	0,297	0	0
I-DirVarAriNeg	154	0,36545	0,056	41	4
I-DirVarBitNeg	154	0,27528	0,117	14	3
I-DirVarRepReq	770	0,25742	0,023	71	8
I-DirVarLogNeg	154	0,25717	0,139	13	0
I-IndVarRepLoc	618	0,21029	0,077	61	16
I-DirVarIncDec	536	0,15278	0,207	31	10
I-IndVarAriNeg	306	0,14298	0,361	108	8
II-ArgDel	92	0,13367	0,513	0	0
I-CovAllNod	438	0,12103	0,335	20	0
II-ArgIncDec	200	0,07677	0,627	2	13
I-DirVarRepGlo	170	0,06369	0,711	25	0
I-IndVarIncDec	684	0,04481	0,764	64	21
I-IndVarRepPar	672	0,00333	0,977	73	15
I-CovAllEdg	390	0,00000	0,000	30	0
I-DirVarRepExt	494	-0,00885	0,943	32	2
I-IndVarRepReq	1391	-0,01200	0,909	162	46
...	...	...	...	...	...
I-RetStaRep	42	-0,46987	0,099	0	0

- **Custo Cumulativo (CC):** número de mutantes gerados pela aplicação dos k primeiros operadores, ou seja, a soma do número de mutantes gerados C_i de cada operador i até a aplicação do operador k ($CC_k = \sum_{i=1}^k C_i$);
- **Redução de Custo (RC):** porcentagem da redução do número de mutantes ($RC_i = 1 - (\frac{CC_i}{\sum_{k=1}^n C_k}) * 100, 1 \leq n \leq |OP|$);
- **Custo Cumulativo de Equivalentes(CCE):** número de mutantes equivalentes gerados pela aplicação dos k primeiros operadores, ou seja, soma-se o número de mutantes equivalentes (CE_i) de cada operador i até a aplicação do operador k ($CCE_k = \sum_{i=1}^k CE_i$);
- **Redução de Custo de Equivalentes(RCE):** porcentagem da redução do número de mutantes equivalentes ($RCE_i = 1 - (\frac{CCE_i}{\sum_{k=1}^n CCE_k}) * 100, 1 \leq n \leq |OP|$).

Por exemplo, na Tabela 4.7 são apresentadas as informações acima coletadas para um conjunto de casos de teste AM-adequado do programa Cal. Essa tabela foi gerada 11 vezes para se obter a média referente a um único programa.

Observe que o incremento proporcionado com a seleção dos casos de teste de cada operador varia. Incremento zero indica que o operador em questão não está agregando nenhum caso de teste novo ao conjunto T , ou seja, o operador está sendo incluído pelos operadores aplicados anteriormente. Desse modo, ordenar a Tabela 4.7 pelo incremento faz com que somente

Tabela 4.7: Dados Coletados para um Conjunto de Casos de Teste AM-adequado: Programa Cal.

Operadores	EM	Inc	CC	RC	CCE	RCE
OLSN	0,5428204	0,5428204	8	99,82%	0	100,00%
OABA	0,9238920	0,3810716	38	99,12%	0	100,00%
SMTC	0,9238920	0,0000000	46	98,94%	0	100,00%
OBNG	0,9238920	0,0000000	46	98,94%	0	100,00%
STR1	0,9718389	0,0479469	70	98,38%	0	100,00%
SSWM	0,9771362	0,0052973	73	98,31%	0	100,00%
SWDD	0,9771362	0,0000000	75	98,27%	0	100,00%
OASN	0,9783812	0,0012450	135	96,88%	0	100,00%
Varr	0,9784038	0,0000226	191	95,59%	2	99,37%
OLRN	0,9903335	0,0119297	215	95,04%	5	98,42%
SMVB	0,9903335	0,0000000	218	94,97%	5	98,42%
OAAA	0,9903335	0,0000000	259	94,02%	5	98,42%
VTWD	0,9974192	0,0070857	383	91,16%	15	95,25%
Oido	0,9974192	0,0000000	398	90,81%	15	95,25%
ORLN	0,9974192	0,0000000	442	89,80%	15	95,25%
Vsrr	0,9995698	0,0021506	833	80,77%	25	92,09%
SSDL	0,9995698	0,0000000	934	78,44%	32	89,87%
OEBA	0,9995698	0,0000000	1015	76,57%	60	81,01%
ORRN	0,9995698	0,0000000	1125	74,03%	73	76,90%
Ccsr	0,9995925	0,0000227	1770	59,14%	75	76,27%
SRSR	0,9995925	0,0000000	1870	56,83%	80	74,68%
ORAN	0,9995925	0,0000000	1980	54,29%	91	71,20%
VDTR	0,9998415	0,0002490	2166	50,00%	191	39,56%
ORBN	0,9998415	0,0000000	2232	48,48%	197	37,66%
Cccr	1,0000000	0,0001585	3171	26,80%	266	15,82%
VSCR	1,0000000	0,0000000	3187	26,43%	267	15,51%
...	...	...	...	...	...	...
Vtrr	1,0000000	0,0000000	4332	0,00%	316	0,00%

operadores que realmente contribuem para a melhoria no escore de mutação sejam considerados. Sempre que os operadores de mutação são reordenados, essa avaliação deve ser repetida. O processo termina quando todos os operadores de mutação estiverem ordenados de forma decrescente a partir de seu incremento. Porém, se simplesmente ordenarmos os operadores pelo seu incremento, deixaríamos de analisar a questão do número de mutantes gerados e equivalentes de cada operador. Para isso foram definidas duas estratégias que são apresentadas a seguir.

4.2 Estratégias para Aplicação dos Operadores de Mutação Considerando o Número de Mutantes Equivalentes

Visto que os operadores que não produzem incremento foram incluídos pelos demais, estes podem ser descartados, reduzindo o custo de aplicação da estratégia. Além disso, foi definida uma relação denominada *SEC (Score-Equivalent-Cost)* que procura priorizar a aplicação dos operadores que proporcionam o maior incremento e possui o menor custo em termos do número de mutantes gerados e do número de mutantes equivalentes como representado abaixo:

$$SEC_i = \left(\frac{\frac{Inc_i}{(CCE_i - CCE_{i-1})}}{(CC_i - CC_{i-1})} \right)$$

A idéia das estratégias é reordenar os operadores até que se obtenha uma ordem decrescente segundo a relação *SEC* (última coluna da Tabela 4.8). As estratégias para o teste de unidade e para o teste de integração são denominadas *Estochastical-Score-Equivalent-Cost Incremental Unit Testing Strategy (ESECUS)* e *Estochastical-Score-Equivalent-Cost Incremental Interface Testing Strategy (ESECIS)*, respectivamente. A definição e aplicação dessas estratégias são apresentadas a seguir.

4.2.1 Estratégia *ESECUS*: Teste de Unidade

A estratégia *ESECUS* estabelece uma classificação para aplicação dos operadores de mutação para o teste de unidade. Estabelecida a classificação primária, apresentada na Seção 4.1.2, a Tabela 4.8 ilustra o primeiro passo da aplicação incremental desses operadores, onde pode-se observar na terceira linha, que o conjunto de caso de teste OBAN-adequado determina um escore de mutação (coluna *EM*) de 0,7908126 que representa um incremento em relação ao escore anterior (coluna *Inc*) de 0,0005356. O custo cumulativo em termos do número de mutantes gerados (coluna *CC*) é de 94 mutantes. Como o custo do critério Análise de Mutantes aplicando-se todos os 71 operadores é de 12834 mutantes, a utilização de apenas 3 operadores (OLSN, OBNG e OBAN) gerou 94 mutantes, o que representa uma redução de custo (coluna *RC*) de 99,27%. Considerando o número de mutantes equivalentes, o custo cumulativo (coluna *CCE*) é de 7 mutantes e a redução de custo no número de equivalentes (coluna *RCE*) é de 99,40%. Dessa forma, os demais operadores de mutação foram aplicados um a um até que um conjunto de caso de teste adequado à Análise de Mutantes (AM-adequado) fosse obtido.

De acordo com o primeiro passo da estratégia *ESECUS*, 45 operadores de unidade são necessários para se obter um conjunto de teste AM-adequado, o que representa uma redução de custo de 6,94% em termos de número de mutantes gerados e 9,12% em termos de mutantes equivalentes. Porém, vale destacar que alguns desses operadores não produzem incremento no escore de mutação. Por exemplo, o operador OAEA (sétima linha) foi incluído pelos operadores aplicados anteriormente (OLSN, OBNG, OBAN, VSCR, OABA e VTWD).

Para o conjunto de operadores apresentado na Tabela 4.8 foram necessárias mais sete reordenações até que a estratégia final fosse obtida (Tabela 4.9). Analisando-se a Tabela 4.9, observa-se que todos os operadores estão ordenados de forma decrescente pela coluna *SEC*. Desejando-se obter um conjunto de teste AM-adequado, 25 operadores são necessários, 20 operadores a menos do que eram necessários no primeiro passo (Tabela 4.8), e a redução de

Tabela 4.8: Aplicação da Estratégia *ESECUS*: Primeiro Passo

<i>Operadores</i>	<i>EM</i>	<i>Inc</i>	<i>CC</i>	<i>RC</i>	<i>CCE</i>	<i>RCE</i>	<i>SEC</i>
OLSN	0,7704806	0,7704806	54	99,58%	1	99,91%	142,6815926
OBNG	0,7902770	0,0197964	69	99,46%	2	99,83%	13,1976000
OBAN	0,7908126	0,0005356	94	99,27%	7	99,40%	0,0428480
VSCR	0,8102240	0,0194114	137	98,93%	9	99,23%	2,2571395
OABA	0,8808572	0,0706332	173	98,65%	10	99,14%	19,6203333
VTWD	0,9638950	0,0830378	595	95,36%	33	97,16%	0,0855531
OAEA	0,9638950	0,0000000	607	95,27%	33	97,16%	0,0000000
ORLN	0,9793578	0,0154628	813	93,67%	54	95,35%	0,0357439
OBBN	0,9793578	0,0000000	823	93,59%	57	95,09%	0,0000000
OASA	0,9793578	0,0000000	847	93,40%	57	95,09%	0,0000000
Ccsr	0,9824258	0,0030680	2240	82,55%	61	94,75%	0,0055061
SMTC	0,9839276	0,0015018	2273	82,29%	62	94,66%	0,4550909
Ccer	0,9910342	0,0071066	3949	69,23%	215	81,50%	0,0002771
ORSN	0,9910342	0,0000000	4145	67,70%	253	78,23%	0,0000000
OLLN	0,9910342	0,0000000	4172	67,49%	253	78,23%	0,0000000
OAAA	0,9910948	0,0000606	4222	67,10%	253	78,23%	0,0121200
OABN	0,9910948	0,0000000	4345	66,14%	261	77,54%	0,0000000
Varr	0,9915596	0,0004648	4514	64,83%	264	77,28%	0,0091677
SSWM	0,9915714	0,0000118	4537	64,65%	265	77,19%	0,0051304
OASN	0,9916598	0,0000884	4619	64,01%	266	77,11%	0,0107805
Vsrr	0,9961092	0,0044494	6240	51,38%	300	74,18%	0,0008073
ORBN	0,9961784	0,0000692	6534	49,09%	355	69,45%	0,0000428
SMVB	0,9962788	0,0001004	6563	48,86%	358	69,19%	0,0115402
OAAAN	0,9962788	0,0000000	6745	47,44%	359	69,10%	0,0000000
OALN	0,9962788	0,0000000	6835	46,74%	360	69,02%	0,0000000
CRCR	0,9963166	0,0000378	7586	40,89%	366	68,50%	0,0000839
SSDL	0,9968792	0,0005626	8032	37,42%	384	66,95%	0,0007008
OEBAN	0,9973250	0,0004458	8287	35,43%	465	59,98%	0,0002158
OESA	0,9973250	0,0000000	8457	34,10%	471	59,47%	0,0000000
OBSN	0,9973250	0,0000000	8467	34,03%	472	59,38%	0,0000000
OARN	0,9973250	0,0000000	8737	31,92%	475	59,12%	0,0000000
ORRN	0,9977312	0,0004062	9252	27,91%	541	53,44%	0,0001195
ORAN	0,9979434	0,0002122	9742	24,09%	602	48,19%	0,0000710
OBRN	0,9979434	0,0000000	9772	23,86%	603	48,11%	0,0000000
OBLN	0,9979434	0,0000000	9782	23,78%	605	47,93%	0,0000000
SDWD	0,9979434	0,0000000	9784	23,76%	605	47,93%	0,0000000
OLRN	0,9985446	0,0006012	9946	22,50%	615	47,07%	0,0037111
Oido	0,9986158	0,0000712	10037	21,79%	618	46,82%	0,0026081
VDTR	0,9998134	0,0011976	10670	16,86%	929	20,05%	0,0000608
SRSR	0,9999044	0,0000910	11154	13,09%	952	18,07%	0,0000817
Vprr	0,9999044	0,0000000	11259	12,27%	953	17,99%	0,0000000
SWDD	0,9999798	0,0000754	11277	12,13%	955	17,81%	0,0209444
OAAA	0,9999798	0,0000000	11702	8,82%	1.025	11,79%	0,0000000
OLBN	0,9999798	0,0000000	11783	8,19%	1.055	9,21%	0,0000000
STRI	1,0000000	0,0000202	11943	6,94%	1.056	9,12%	0,0012625
...	...	...	...	...	...	...	...
Vtrr	1,0000000	0,0000000	12834	0,00%	1.162	0,00%	0,0000000

custo foi de 27,09% e 24,44%, em termos de número de mutantes gerados e número de mutantes equivalentes, respectivamente. Usando somente 15 operadores, um escore de mutação superior a 0,99 é obtido com uma redução de custo em termos de número de mutantes gerados de 87,92% e de 93,80% em relação ao número de mutantes equivalentes.

4.2.2 Estratégia *ESECIS*: Teste de Integração

Considerando o teste de integração, o mesmo processo descrito anteriormente foi realizado para definir a estratégia *ESECIS*, considerando os 33 operadores implementados na ferramenta

Tabela 4.9: Aplicação da Estratégia *ESECUS*: Último Passo

Operadores	EM	Inc	CC	RC	CCE	RCE	SEC
OLSN	0,7704806	0,7704806	54	99,58%	1	99,91%	142,6815926
ÔABA	0,8505766	0,0800960	90	99,30%	2	99,83%	22,2488889
SMTC	0,9075436	0,0569670	123	99,04%	3	99,74%	17,2627273
OBNG	0,9185092	0,0109656	138	98,92%	4	99,66%	7,3104000
STRI	0,9669142	0,0484050	298	97,68%	5	99,57%	3,0253125
SSWM	0,9701248	0,0032106	321	97,50%	6	99,48%	1,3959130
SWDD	0,9708530	0,0007282	339	97,36%	8	99,31%	0,2022778
OASN	0,9717226	0,0008696	421	96,72%	9	99,23%	0,1060488
Varr	0,9750402	0,0033176	590	95,40%	12	98,97%	0,0654359
OLRN	0,9823772	0,0073370	752	94,14%	22	98,11%	0,0452901
SMVB	0,9826386	0,0002614	781	93,91%	25	97,85%	0,0300460
OAAA	0,9826892	0,0000506	831	93,53%	25	97,85%	0,0101200
VTWD	0,9893484	0,0066592	1253	90,24%	48	95,87%	0,0068609
Óido	0,9894788	0,0001304	1344	89,53%	51	95,61%	0,0047766
ORLN	0,9905128	0,0010340	1550	87,92%	72	93,80%	0,0023902
Vsrr	0,9970402	0,0065274	3171	75,29%	106	90,88%	0,0011843
SSDL	0,9975146	0,0004744	3617	71,82%	124	89,33%	0,0005909
OEBA	0,9981108	0,0005962	3872	69,83%	205	82,36%	0,0002886
ORRN	0,9985798	0,0004690	4387	65,82%	271	76,68%	0,0001380
Ccsr	0,9986372	0,0000574	5780	54,96%	275	76,33%	0,0001030
SRSR	0,9987282	0,0000910	6264	51,19%	298	74,35%	0,0000817
ORAN	0,9989404	0,0002122	6754	42,44%	670	42,34%	0,0000480
ORBN	0,9999558	0,0000696	7681	40,15%	725	37,61%	0,0000430
Cccr	1,0000000	0,0000442	9357	27,09%	878	24,44%	0,0000017

PROTEUM/IM. No primeiro passo da aplicação da estratégia, 32 operadores foram necessários para obter um conjunto MI-adequado e a redução de custo em termos do número de mutantes gerados foi de 0,30%, não obtendo redução de custo em relação ao número de mutantes equivalentes, como mostra a Tabela 4.10.

Os operadores de integração, sofreram cinco reordenações até que a estratégia final fosse estabelecida. O resultado é apresentado na Tabela 4.11. Nota-se que um conjunto de casos teste IM-adequado é obtido aplicando-se 19 operadores, 13 operadores a menos dos que foram necessário no primeiro passo, reduzindo o custo em 16,91% em termos do número de mutantes gerados e 20,48% em relação ao número de mutantes equivalentes. Com 6 operadores de mutação um escore superior a 0,99 é obtido com uma redução de custo de 78,32% e 86,53% em relação ao número de mutantes gerados e equivalentes, respectivamente.

De fato, existem várias formas de estabelecer uma ordem de aplicação dos operadores de mutação para o teste de unidade e integração ou para selecionar um subconjunto de operadores que mantenha as características mínimas exigidas para a aplicação do teste baseado em mutação. Uma abordagem promissora é a determinação de um conjunto de operadores de mutação essencial. Um conjunto essencial de operadores de mutação pode ser definido como um subconjunto *SC* de operadores de mutação de forma que, conseguindo-se um conjunto de teste *T* capaz de distinguir os mutantes gerados pelos operadores de *SC* (conjunto *T SC*-adequado), *T* seja capaz de distinguir, idealmente, todos os mutantes não equivalentes gerados pelo conjunto total de operadores de mutação definido.

Tabela 4.10: Aplicação da Estratégia *ESECIS*: Primeiro Passo

<i>Operadores</i>	<i>EM</i>	<i>Inc</i>	<i>CC</i>	<i>RC</i>	<i>CCE</i>	<i>RCE</i>	<i>SEC</i>
Il-ArgStdDif	0,3141262	0,3141262	43	99,69%	0	100,00%	73,0526047
I-DirVarRepCon	0,9546916	0,6405654	1423	89,85%	87	94,79%	0,0533538
I-IndVarRepCon	0,9854254	0,0307338	3978	71,63%	432	74,13%	0,0003487
Il-ArgStdAli	0,9854254	0,0000000	3999	71,48%	438	73,77%	0,0000000
I-DirVarRepLoc	0,9860472	0,0006218	4487	68,00%	472	71,74%	0,0003748
I-DirVarRepPar	0,9870268	0,0009796	4872	65,26%	520	68,86%	0,0005301
Il-ArgAriNeg	0,9871312	0,0001044	4898	65,07%	520	68,86%	0,0401538
Il-ArgBitNeg	0,9871312	0,0000000	4924	64,89%	520	68,86%	0,0000000
Il-ArgLogNeg	0,9871312	0,0000000	4950	64,70%	520	68,86%	0,0000000
I-DirVarAriNeg	0,9871312	0,0000000	5104	63,61%	565	66,17%	0,0000000
I-DirVarBitNeg	0,9871758	0,0000446	5258	62,51%	582	65,15%	0,0001704
I-DirVarRepReq	0,9871758	0,0000000	6028	57,02%	661	60,42%	0,0000000
I-DirVarLogNeg	0,9871758	0,0000000	6182	55,92%	674	59,64%	0,0000000
I-IndVarRepLoc	0,9914516	0,0042758	6800	51,51%	751	55,03%	0,0008985
I-DirVarIncDec	0,9940118	0,0025602	7336	47,69%	792	52,57%	0,0011650
I-IndVarAriNeg	0,9940118	0,0000000	7642	45,51%	908	45,63%	0,0000000
Il-ArgDel	0,9940118	0,0000000	7734	44,85%	908	45,63%	0,0000000
I-CovAllNod	0,9959582	0,0019464	8172	41,73%	928	44,43%	0,0022219
Il-ArgIncDec	0,9959582	0,0000000	8372	40,30%	943	43,53%	0,0000000
I-DirVarRepGlo	0,9960932	0,0001350	8542	39,09%	968	42,04%	0,0003176
I-IndVarIncDec	0,9963018	0,0002086	9226	34,21%	1.053	36,95%	0,0000359
I-IndVarRepPar	0,9966648	0,0003630	9898	29,42%	1.141	31,68%	0,0000614
I-CovAllEdg	0,9966772	0,0000124	10288	26,64%	1.171	29,88%	0,0000106
I-DirVarRepExt	0,9975090	0,0008318	10782	23,12%	1.205	27,84%	0,0004952
I-IndVarRepReq	0,9975612	0,0000522	12173	13,20%	1.413	15,39%	0,0000018
I-IndVarBitNeg	0,9975834	0,0000222	12479	11,02%	1.451	13,11%	0,0000191
Il-FunCalDel	0,9976452	0,0000618	12733	9,21%	1.480	11,38%	0,0000839
I-IndVarLogNeg	0,9976452	0,0000000	13039	7,02%	1.519	9,04%	0,0000000
I-RepStdDel	0,9976452	0,0000000	13104	6,56%	1.531	8,32%	0,0000000
I-IndVarRepGlo	0,9980332	0,0003880	13416	4,34%	1.610	3,59%	0,0001574
Il-ArgRepReq	0,9980332	0,0000000	13471	3,94%	1.610	3,59%	0,0000000
I-IndVarRepExt	1,0000000	0,0019668	13982	0,30%	1.670	0,00%	0,0006415

Tabela 4.11: Aplicação da Estratégia *ESECIS*: Último Passo

<i>Operadores</i>	<i>EM</i>	<i>Inc</i>	<i>CC</i>	<i>RC</i>	<i>CCE</i>	<i>RCE</i>	<i>SEC</i>
Il-ArgStdDif	0,3141262	0,3141262	43	99,69%	0	100,00%	73,0526047
Il-ArgAriNeg	0,3179172	0,0037910	69	99,51%	0	100,00%	1,4580769
I-DirVarRepCon	0,9554886	0,6375714	1449	89,67%	87	94,79%	0,0531044
I-CovAllNod	0,9746970	0,0192084	1887	86,54%	107	93,59%	0,0219274
I-DirVarIncDec	0,9840092	0,0093122	2423	82,72%	148	91,14%	0,0042374
I-IndVarRepLoc	0,9942372	0,0102280	3041	78,32%	225	86,53%	0,0021494
I-IndVarRepExt	0,9974862	0,0032490	3552	74,67%	285	82,93%	0,0010597
I-DirVarRepGlo	0,9975972	0,0001110	3722	73,46%	310	81,44%	0,0002612
I-DirVarRepExt	0,9980194	0,0004222	4216	69,94%	344	79,40%	0,0002514
I-DirVarRepPar	0,9983328	0,0003134	4601	67,19%	392	76,53%	0,0001696
I-IndVarRepGlo	0,9987352	0,0004024	4913	64,97%	471	71,80%	0,0001633
I-IndVarRepPar	0,9995338	0,0007986	5585	60,18%	559	66,53%	0,0001350
Il-FunCalDel	0,9995956	0,0000618	5839	58,36%	588	64,79%	0,0000839
I-IndVarBitNeg	0,9996850	0,0000894	6145	56,18%	626	62,51%	0,0000769
I-CovAllEdg	0,9996974	0,0000124	6535	53,40%	656	60,72%	0,0000106
I-IndVarIncDec	0,9997346	0,0000372	7219	48,52%	741	55,63%	0,0000064
I-DirVarRepLoc	0,9997420	0,0000074	7707	45,04%	775	53,59%	0,0000045
I-IndVarRepCon	0,9999776	0,0002356	10262	26,83%	1.120	32,93%	0,0000027
I-IndVarRepReq	1,0000000	0,0000224	11653	16,91%	1.328	20,48%	0,0000008

Para determinação desse subconjunto, Barbosa (1998) definiu um procedimento chamado *Essencial*, que visa à determinação de um conjunto essencial de operadores de mutação. Em seu trabalho Barbosa aplicou o procedimento nos operadores de mutação implementados na ferramenta *Proteum*, com o qual se obteve um conjunto essencial de operadores que determinavam

um alto grau de adequação em relação ao critério Análise de Mutantes (0,996) com uma redução de custo da ordem de 65%. Para os programas 5-UNIX, em nível de unidade, o conjunto de operadores essenciais (AM-essencial) obtido foi:

1. SMTc - Multiple Trip continue;
2. SSDL - Statement Deletion;
3. OEBA - Plain by Bitwise Assignment Replacement;
4. ORRN - Relational Operator Replacement;
5. VTWD - Twiddle Mutations; e
6. VDTR - Domain Traps.

Com o objetivo de verificar se os mesmos resultados se confirmavam para os operadores de mutação de interface, Vincenzi (1998) aplicou o procedimento definido por Barbosa (1998) no contexto do teste de integração, utilizando os operadores implementados na ferramenta *PROTEUM/IM* obtendo um escore de mutação de 0,998 com uma redução de custo de aproximadamente 73%. O conjunto de operadores essenciais para o teste de integração (MI-essencial) para os programas 5-UNIX é:

1. ArgAriNeg - Inserts Arithmetic Negation at Arguments;
2. CovAllNode - Coverage of All Nodes;
3. DirVarBitNeg - Inserts Bit Negation at Interface Variable;
4. IndVarBitNeg - Inserts Bit Negation at Non Interface Variable;
5. IndVarRepGlob - Replaces Non Interface Variable by Set G;
6. IndVarRepExt - Replaces Non Interface Variable by Set E;
7. IndVarRepLoc - Replaces Non Interface Variable by Set L; e
8. IndVarRepReq - Replaces Non Interface Variable by Set R.

Em relação à estratégia incremental de unidade definida na Seção 4.2.1 (Tabela 4.9), observa-se que, para obter um escore de mutação próximo a 0,998, deveriam ser utilizados os 17 primeiros operadores e a redução de custo proporcionada seria em torno de 71,82%, aproximadamente 10,23% a menos do que seria obtido com a utilização do conjunto essencial. Para

a estratégia incremental de integração definida na Seção 4.2.2 (Tabela 4.11), os resultados obtidos são semelhantes, para se obter um escore de mutação próximo de 0,998, deveriam ser utilizados os 8 primeiros operadores e a redução de custo seria em torno de 73,22%, aproximadamente 9,68% a menos do que seria obtido com a utilização do conjunto essencial para o teste de integração. Desse modo, uma estratégia incremental que inicie com a aplicação dos operadores essenciais mostra-se melhor em termos de redução de custo do que as estratégias apresentadas nas Tabelas 4.9 e 4.11. Como, em geral, apenas a utilização dos conjuntos essenciais não produziram conjuntos de casos de teste adequados, foi definida uma seqüência para a aplicação dos demais operadores baseada em uma relação entre escore de mutação, custo de aplicação em termos do número de mutantes gerados, custo em termos do número de equivalentes e a dificuldade de se matar mutantes geradores por um determinado operador como nas estratégias *ESECUS* e *ESECIS*.

Assim sendo, nas próximas seções, as estratégias incrementais de aplicação dos operadores de mutação serão reavaliadas considerando que os operadores essenciais tenham prioridade em relação aos demais operadores.

4.3 Estratégias para Aplicação dos Operadores de Mutação Priorizando os Operadores Essenciais

Para estabelecer uma ordem inicial de aplicação dos operadores de mutação, priorizando o conjunto de operadores AM-essencial e MI-essencial, os operadores foram classificados da seguinte forma:

1. Operadores AM-essencial e MI-essencial respeitando a ordem de aplicação incremental estabelecida pelo próprio procedimento *Essencial* (Barbosa, 1998); e
2. Demais operadores respeitando a ordem estabelecida nas Tabelas 4.5 e 4.6, ou seja, operadores que geram mutantes mais difíceis de serem mortos.

As estratégias para o teste de unidade e para o teste de integração são denominadas *Sufficient Stochastic-Score-Equivalent-Cost Incremental Unit Testing Strategy* (*SESECUS*) e *Sufficient Stochastic-Score-Equivalent-Cost Incremental Interface Testing Strategy* (*SESECIS*), respectivamente, e são descritas a seguir.

4.3.1 Estratégia *SESECUS*: Teste de Unidade

Para garantir que os operadores do conjunto essencial sejam aplicados primeiro, somente os operadores não pertencentes a AM-essencial são reordenados de forma decrescente pela relação

SEC definida na Seção 4.2. Novamente o processo termina quando todos os operadores não pertencentes ao conjunto AM-essencial estiverem ordenados de forma decrescente pela relação *SEC*. Para isso foram necessárias mais quatro iterações e o resultado final obtido é apresentado na Tabela 4.12.

Tabela 4.12: Aplicação da Estratégia *SESECUS*: Último Passo

Operadores	EM	Inc	CC	RC	CCE	RCE	SEC
SMTC	0,8275636	0,8275636	33	99,74%	1	99,91%	250,7768485
SSDL	0,9663604	0,1387968	479	96,27%	19	98,36%	0,1728909
OEBA	0,9705834	0,0042230	734	94,28%	100	91,39%	0,0020445
ORRN	0,9893462	0,0187628	1249	90,27%	166	85,71%	0,0055201
VTWD	0,9950028	0,0056566	1671	86,98%	189	83,73%	0,0058279
VDTR	0,9974806	0,0024778	2304	82,05%	500	56,97%	0,0001259
OASN	0,9980654	0,0005848	2386	81,41%	501	56,88%	0,0713171
SWDD	0,9981408	0,0000754	2404	81,27%	503	56,71%	0,0209444
OLSN	0,9982450	0,0001042	2458	80,85%	504	56,63%	0,0192963
Varr	0,9986126	0,0003676	2627	79,53%	507	56,37%	0,0072505
Oido	0,9987550	0,0001424	2718	78,82%	510	56,11%	0,0052161
QLRN	0,9993938	0,0006388	2880	77,56%	520	55,25%	0,0039432
STRI	0,9994142	0,0000204	3040	76,31%	521	55,16%	0,0012750
SRSR	0,9995288	0,0001146	3524	72,54%	544	53,18%	0,0001029
Vsrr	0,9998816	0,0003528	5145	59,91%	578	50,26%	0,0000640
ORBN	0,9999512	0,0000696	5439	57,62%	633	45,52%	0,0000430
Ccsr	0,9999558	0,0000046	6832	46,77%	637	45,18%	0,0000083
Ccrr	1,0000000	0,0000442	8508	33,71%	790	32,01%	0,0000017

Analisando-se a Tabela 4.12, um conjunto de casos de teste AM-adequado é obtido com a aplicação de 18 operadores de mutação, 27 operadores a menos do que eram necessários no primeiro passo e a redução de custo foi de 33,71% e 32,01% em termos do número de mutantes gerados e número de mutantes equivalentes, respectivamente. Observa-se que com apenas 5 operadores de mutação, um escore superior a 0,995 é obtido com uma redução de custo em termos do número de mutantes gerados de 86,98% e de 83,73% em relação ao número de mutantes equivalentes.

Se comparado com a estratégia aplicada anteriormente para o teste de unidade (*ESECUS*), observa-se que *SESECUS* obteve uma maior redução de custo, tanto em termos do número de mutantes gerados (6,62%) quanto em termos do número de mutantes equivalentes (7,57%).

4.3.2 Estratégia *SESECIS*: Teste de Integração

No teste de integração (Tabela 4.13), observa-se que, para se obter um conjunto de casos de teste MI-adequado, 16 operadores de mutação devem ser aplicados e a redução de custo obtida é de 25,96% e 24,67% em termos do número de mutantes gerados e mutantes equivalentes, respectivamente. Com a prioridade de aplicação do conjunto de operadores IM-essencial, uma maior redução, se comparado com a estratégia anterior (*ESECIS*), é obtida, tanto em relação do número de mutantes gerados (9,05%) quanto ao número de mutantes equivalentes (4,19%).

Tabela 4.13: Aplicação da Estratégia *SESECIS*: Último Passo

<i>Operadores</i>	<i>EM</i>	<i>Inc</i>	<i>CC</i>	<i>RC</i>	<i>CCE</i>	<i>RCE</i>	<i>SEC</i>
II-ArgAriNeg	0,2997898	0,2997898	26	99,81%	0	100,00%	115,3037692
I-CovAllNod	0,8488350	0,5490452	464	96,69%	20	98,80%	0,6267639
I-DirVarBitNeg	0,9086880	0,0598530	618	95,59%	37	97,78%	0,2286211
I-IndVarBitNeg	0,9817834	0,0730954	924	93,41%	75	95,51%	0,0628615
I-IndVarRepGlo	0,9858078	0,0040244	1236	91,19%	154	90,78%	0,0016327
I-IndVarRepExt	0,9943990	0,0085912	1747	87,54%	214	87,19%	0,0028021
I-IndVarRepLoc	0,9975594	0,0031604	2365	83,14%	291	82,57%	0,0006641
I-IndVarRepReq	0,9981328	0,0005734	3756	73,22%	499	70,12%	0,0000198
I-DirVarRepExt	0,9985340	0,0004012	4250	69,69%	533	68,08%	0,0002389
I-DirVarRepPar	0,9988892	0,0003552	4635	66,95%	581	65,21%	0,0001922
I-IndVarRepPar	0,9996448	0,0007556	5307	62,16%	669	59,94%	0,0001278
II-FunCalDel	0,9997066	0,0000618	5561	60,35%	698	58,20%	0,0000839
I-DirVarRepGlo	0,9997312	0,0000246	5731	59,13%	723	56,71%	0,0000579
I-DirVarIncDec	0,9998280	0,0000968	6267	55,31%	764	54,25%	0,0000440
I-CovAllEdg	0,9998404	0,0000124	6657	52,53%	794	52,46%	0,0000106
I-DirVarRepLoc	0,9998478	0,0000074	7145	49,05%	828	50,42%	0,0000045
I-IndVarIncDec	0,9998702	0,0000224	7829	44,17%	913	45,33%	0,0000039
I-IndVarRepCon	1,0000000	0,0001298	10384	25,96%	1.258	24,67%	0,0000015

Desejando-se atingir um escore de mutação superior a 0,99 são necessários somente 6 operadores de mutação obtendo uma redução de custo do número de mutantes gerados de 87,54% e de 87,19% em relação ao número de mutantes equivalentes.

A seguir os resultados obtidos com a aplicação das 4 estratégias apresentadas são comparados com outras estratégias definidas por Vincenzi et al. (2001).

4.4 Comparação com Outras Estratégias

Para verificar o quanto as estratégias propostas foram satisfatórias, faz necessário a comparação destas com outras já definidas. As estratégias a serem comparadas são:

- *SCUS* e *SCIS* (Vincenzi et al., 2001) com as estratégias *ESECUS* e *ESECIS*; e
- *SUS* e *SIS* (Vincenzi et al., 2001) com as estratégias *SESECUS* e *SESECIS*.

A primeira comparação, se deve pelo fato de ambas as estratégias não priorizarem a aplicação dos operadores de mutação essenciais. *SCUS* e *SCIS* levam em consideração apenas o incremento no escore de mutação que um conjunto de casos de teste adequado para um determinado operador tem sobre o conjunto de todos os outros operadores e o número de mutantes gerados por este operador. Já as estratégias *ESECUS* e *ESECIS*, além de considerar as características como o incremento e o número de mutantes gerados, elas priorizam a aplicação dos operadores que geram um menor número de mutantes equivalentes e os que são mais difíceis de serem mortos.

A segunda comparação se deve ao fato das estratégias priorizarem a aplicação dos operadores essenciais. Os dados utilizados para comparação entre essas estratégias são apresentados nas Tabelas 4.14 e 4.15.

Tabela 4.14: Conjunto de Casos de Teste Quase Adequado - (Escore de Mutação maior ou igual a 0,99)

Unidade				
Estratégias	Custo Estratégia (CC)	Score (EM)	Redução Custo (RC)	Redução Equivalentes (RCE)
ESECUS	1550	0,991	87,92%	93,80%
SCUS	925	0,991	92,79%	97,82%
SESECUS	1671	0,995	86,98%	83,73%
SUS	1671	0,995	86,98%	83,73%
Interface				
Estratégias	Custo Estratégia (CC)	Score (EM)	Redução Custo (RC)	Redução Equivalentes (RCE)
ESECIS	3041	0,994	78,32%	86,53%
SCIS	1801	0,991	87,16%	86,86%
SESECIS	1747	0,994	87,54%	87,19%
SIS	1747	0,994	87,54%	87,19%

Tabela 4.15: Conjunto de Casos de Teste Adequado - (Escore de Mutação igual a 1,00)

Unidade			
Estratégias	Custo Estratégia (CC)	Redução Custo (RC)	Redução Equivalentes (RCE)
ESECUS	9357	27,09%	24,44%
SCUS	8684	32,34%	13,03%
SESECUS	8508	33,71%	32,01%
SUS	7642	40,46%	21,83%
Interface			
Estratégias	Custo Estratégia (CC)	Redução Custo (RC)	Redução Equivalentes (RCE)
ESECIS	11653	16,91%	20,48%
SCIS	10606	24,37%	23,98%
SESECIS	10384	25,96%	24,67%
SIS	10384	25,96%	24,67%

Considerando o teste de unidade, para gerar conjuntos de teste que determinam escores de mutação superiores a 0,99 (Tabela 4.14), *SCUS* apresenta-se melhor que *ESECUS* tanto na redução do número de mutantes gerados quanto na redução do número de equivalentes: 4,87 e 4,02 pontos percentuais a mais do que *ESECUS*, respectivamente. Para o teste de integração, *SCIS* obteve uma maior redução de custo que *ESECIS* em relação ao número de mutantes gerados (em torno de 9 pontos percentuais), entretanto, considerando-se o número de mutantes equivalentes, *ESECIS* e *SCIS* obtiveram praticamente a mesma redução de custo (86%). Como pode ser observado na Tabela 4.14, os dados referentes as estratégias de unidade, *SUS* e *SESECUS*, e de integração, *SIS* e *SESECIS*, são idênticos visto que somente a aplicação dos operadores essenciais já determina escores de mutação superiores a 0,99.

Desejando-se obter conjuntos de teste adequados (Tabela 4.15) observa-se que *SCUS* determinou um menor custo no número de mutantes gerados, 5,25 pontos percentuais a mais que *ESECUS*. No que se refere ao número de mutantes equivalentes, *ESECUS* determinou uma redução de 24,44 e 11,41 pontos percentuais a mais que *SCUS*. Para a determinação de conjuntos de teste MI-adequados, *SCIS* obteve uma maior redução de custo do que *ESECIS*, 7,46 pontos percentuais a mais em termos do número de mutantes gerados e 3,5 pontos percentuais em relação ao número de mutantes equivalentes.

Em relação as estratégias que priorizam a aplicação dos operadores de mutação essenciais, para o teste de unidade, *SUS* obteve uma maior redução em termos do número de mutantes gerados, 6,75 pontos percentuais a mais que *SESECUS*. Porém, *SESECUS* obteve uma maior redução em relação ao número de mutantes equivalentes, 10,18 pontos percentuais a mais que *SUS*. Em relação ao teste de integração, ambas as estratégias definiram o mesmo subconjunto de operadores de mutação, ou seja, a redução tanto em relação ao número de mutantes gerados como ao número de mutantes equivalentes foram a mesma. Vale ressaltar que, apesar do subconjunto de operadores ser o mesmo a sequência de aplicação é diferente.

De forma geral o que pode ser observado é que em nível de unidade *ESECUS* e *SESECUS* determinam uma maior redução no número de mutantes equivalentes do que *SCUS* e *SUS* para obtenção de conjuntos de casos de teste adequados. Por outro lado, *SCUS* e *SUS* são melhores no que se refere à redução de custo em termos do número de mutantes gerados e na obtenção de conjuntos de casos de teste que determinam escores de mutação superiores a 0,99.

Em nível de integração, observa-se que *SCIS* obteve melhor resultados que *ESECIS* nos dois aspectos, porém levando em consideração a prioridade de aplicação dos operadores essenciais, tanto *SESECIS* como *SIS* obtiveram os mesmos resultados. O fato de *SCUS* e *SCIS* apresentarem, em termos do número de mutantes equivalentes, uma maior redução de custo do que *ESECUS* e *ESECIS* se explica devida a primeira ordenação dos operadores de mutação para aplicação das estratégias *ESECUS* e *ESECIS* não considerarem o número de mutantes equivalentes.

Tendo em vista que, em geral, a execução dos mutantes é feita de forma automática e a análise dos mutantes vivos requerer a intervenção do testador, por ser o problema de determinar a equivalência de um mutante uma questão indecível, uma redução 11,41 pontos percentuais no número de mutantes equivalentes pode ser considerada mais significativa do que uma redução de 5,25 pontos percentuais no número de mutantes gerados, devido ao esforço requerido na análise dos mutantes vivos. Com isso pode-se concluir que as estratégias que priorizam a aplicação dos operadores de mutação essenciais são menos custosas que as demais, ou seja, *SESECUS* para o teste de unidade e *SESECIS* para o teste de integração foram as que apresentaram os melhores resultados.

4.5 Considerações Finais

Neste capítulo, foram apresentadas algumas abordagens para a determinação de estratégias incrementais para aplicação dos operadores de mutação para o teste de unidade e integração. Utilizando tais abordagens, inicialmente, uma sequência de aplicação dos operadores foi estabelecida considerando os seguintes fatores: operadores que determinavam o maior incremento no escore de mutação em relação aos demais, operadores que geravam o menor número de mu-

tantes e mutantes equivalentes e os operadores que geravam mutantes mais difíceis de serem mortos. Priorizando os operadores de mutação que correspondem as características acima citadas, a obtenção de conjuntos AM-adequado e MI-adequado, possibilitou uma redução de custo em termos do número de mutantes gerados de 27,09% e 16,91% e em termos do número de mutantes equivalentes de 24,44% e 20,48%, respectivamente.

A partir dos conjuntos essenciais de operadores de mutação obtidos por Barbosa (1998) e Vincenzi et al. (2001), uma nova estratégia incremental de aplicação dos operadores foi estabelecida. Observou-se que, a estratégia que priorizou a aplicação dos operadores de mutação essenciais possibilitou uma melhor redução do custo tanto em termos do número de mutantes gerados quanto em termos do número de mutantes equivalentes. Para o teste de unidade, a redução foi de 33,71% e 32,01% e para o teste de integração a redução foi de 25,96% e 24,67%, respectivamente. A partir dos resultados obtidos, demonstrou-se que somente a utilização dos conjuntos essenciais de operadores de mutação é suficiente para se construir conjuntos de casos de teste que determinam escores de mutação superiores a 0,99.

No geral, resultados demonstram que podem existir inúmeros subconjuntos de operadores de mutação capazes de selecionar conjuntos de casos de teste adequados e, para se obter o melhor conjunto, o ideal seria que todas as combinações possíveis de operadores de mutação fossem consideradas. Entretanto, visto que o critério Análise de Mutantes possui 71 operadores e o Mutação de Interface possui 33 operadores, o número de combinações que deveriam ser investigadas é de 2^{71} para o teste de unidade e 2^{33} para o teste de integração, o que dificulta tal análise devido ao alto custo computacional envolvido para a aplicação de todas as combinações possíveis.

As abordagens apresentadas procuram fornecer alternativas pragmáticas para selecionar conjuntos de operadores de mutação que possibilitam uma redução no custo de aplicação dos critérios e ainda assim a seleção de conjuntos de casos de teste adequados ou próximos da adequação para ambos os critérios.

Conclusões e Trabalhos Futuros

O OBJETIVO principal da atividade de teste é aumentar a confiabilidade e garantir a qualidade do software para que este seja liberado com o mínimo de erros possível. Essa atividade, no entanto, consome grande parte dos custos envolvidos durante o desenvolvimento e, apesar disso, não garante um produto completamente sem erros.

Um dos pontos fundamentais na atividade de teste é a necessidade de critérios de adequação que auxiliem no projeto de casos de teste, fornecendo indicação de sua qualidade. Critérios Funcionais, Estruturais e Baseados em Erros devem, sempre que possível, ser utilizados em conjunto, aumentando as chances de que possíveis defeitos possam ser revelados. Ressalta-se ainda a relevância de estudos empíricos, conduzidos no contexto de teste de software, para o estabelecimento de estratégias de teste de baixo custo e alta eficácia. Os resultados desses estudos motivam a transferência tecnológica de critérios de teste, emergentes no meio acadêmico, para ambientes comerciais e industriais.

Dois dos critérios de teste que têm se destacado devido à alta eficácia em revelar a presença de erros são o critério Análise de Mutantes e o critério Mutação de Interface. No entanto, ambos apresentam limitações de custo para sua aplicação. O primeiro aspecto deste problema está diretamente relacionado com o grande número de mutantes que pode ser gerado mesmo para programas simples. O segundo aspecto restritivo quando ao custo de aplicação do critério refere-se ao esforço para a determinação dos mutantes equivalentes que, em geral, requer a intervenção do testador ou a elaboração de heurísticas. Assim, a definição de estratégias incrementais para aplicação dos operadores de mutação deve levar em consideração não somente

aspectos de cobertura e eficácia mas também o custo associado à probabilidade de criação de mutantes equivalentes.

Neste trabalho foi aplicado um estudo analítico e empírico sobre os operadores de mutação implementados nas ferramentas *Proteum* e *PROTEUM/IM*, considerando os aspectos de equivalência. A partir dessa análise foram determinadas heurísticas para determinação de mutantes equivalentes tanto pela semântica do operador como para o domínio de aplicação. Também foi feita uma análise estatística sobre os operadores de mutação com o objetivo de fornecer *guidelines* ao testador para auxiliá-lo na atividade de análise dos mutantes vivos, ou seja, determinar quais operadores têm maior probabilidade de gerar mutantes equivalentes e quais aqueles que geram mutantes que morrem facilmente. Observou-se que, apesar de não ser uma regra geral, seis operadores de mutação referentes ao teste de unidade e sete referentes ao teste de integração estão entre os 10 operadores mais custosos, tanto em termos do número de mutantes gerados quanto no número de mutantes equivalentes e q-equivalentes. Com isso, deve-se procurar aplicar operadores menos custosos que incluam esses operadores.

Procurando reduzir o número de operadores de mutação e o número de mutantes equivalentes, foram estabelecidas, a princípio, duas estratégias de teste denominadas *Estochastical-Score-Equivalent-Cost Incremental Unit Testing Strategy (ESECUS)* e *Estochastical-Score-Equivalent-Cost Incremental Interface Testing Strategy (ESECIS)*, para aplicação dos critérios Análise de Mutantes e Mutação de Interface, respectivamente. Tais estratégias avaliam cada operador de mutação segundo os aspectos de escore de mutação, número de mutantes gerados e número de mutantes equivalentes estabelecendo uma ordem incremental para a aplicação dos mesmos, contribuindo para viabilizar a aplicação do Teste de Mutação tanto para o teste de unidade quanto de integração. Também foram estabelecidas duas estratégias nas quais, além de considerar as características acima citadas, priorizou-se a aplicação dos operadores de mutação essenciais para aplicação da estratégia. Essas estratégias foram denominadas *Sufficient Estochastical-Score-Equivalent-Cost Incremental Unit Testing Strategy (SESECUS)* e *Sufficient Estochastical-Score-Equivalent-Cost Incremental Interface Testing Strategy (SESECIS)*.

De um modo geral, para os programas utilizados, observou-se que as estratégias de teste permitem, mesmo utilizando um subconjunto dos operadores de mutação, determinar conjuntos de casos de teste adequados ao conjunto total de operadores com uma redução de custo acima de 16% (tanto em número de mutantes equivalentes como de mutantes gerados) para se obter um conjunto de casos de teste adequado. Além disso, reduções no custo da aplicação dos critérios superiores a 78% podem ser obtidas para se atingir escores de mutação acima de 0,99, diminuindo consideravelmente o número de mutantes gerados e o número de mutantes a serem analisados como é apresentado no Capítulo 4.

5.1 Contribuições

Pode-se destacar como contribuições deste trabalho:

- Análise empírica dos operadores de mutação referentes aos critérios Análise de Mutantes e Mutação de Interface, avaliando o custo tanto em relação ao número de mutantes gerados como em relação ao número de mutantes equivalentes;
- Coleta de dados sobre causas e padrões de equivalência de mutantes, fundamentais para o desenvolvimento de heurísticas que automatizem esse processo;
- Estabelecimento de heurísticas para determinação de mutantes equivalentes, facilitando a vida do testador na fase de análise dos mutantes vivos;
- Redução do custo de aplicação dos critérios Análise de Mutantes e Mutação de Interface, através da utilização de um subconjunto de operadores de mutação, contribuindo para a aplicação do critério em ambientes comerciais e industriais; e
- Adaptação do Modelo Matemático de Newton Raphson (McCullagh, 1989) para determinação dos operadores de mutação que geram mutantes difíceis de serem distinguidos;
- Produção de dados históricos a respeito dos critérios Análise de Mutantes e Mutação de Interface.

5.2 Trabalhos Futuros

Dentre as atividades que devem ser realizadas como continuidade deste trabalho, pode-se destacar:

- Reproduzir os experimentos apresentados neste trabalho em outros domínios de aplicação com o objetivo de obter informações mais abrangentes a respeito dos operadores de mutação de unidade e interface;
- Com base na análise aplicada para estabelecimento das estratégias definidas nesse trabalho, implementar e integrar às ferramentas *Proteum* e *PROTEUM/IM* algoritmos que determinam uma seqüência de aplicação dos operadores de mutação, visando uma redução no custo de aplicação dos critérios;
- A partir dos dados coletados neste trabalho, implementar e integrar às ferramentas *Proteum* e *PROTEUM/IM* algoritmos que determinem automaticamente a equivalência de mutantes;

- Reimplementar os operadores de mutação evitando a geração de mutantes que não comprometerá a eficácia dos critério Análise de Mutantes e Mutação de Interface, diminuindo assim o custo de aplicação dos mesmos; e
- Redefinir os operadores essenciais levando-se em consideração os mutantes equivalentes.
- Modificar e melhorar o algoritmo matemático utilizado para determinação dos operadores de mutação que geram mutantes difíceis de serem distinguidos procurando estabelecer uma melhor classificação dos operadores.
 - Nesse sentido, vem sendo desenvolvido um trabalho (Jorge et al., 2002a) no qual o algoritmo de Newton-Raphson, utilizado neste trabalho, será melhor adaptado ao problema em questão, procurando uma melhor classificação dos operadores de mutação.

Referências Bibliográficas

- ACREE, A.; BUDD, T.; DEMILLO, R.; LIPTON, R.; SAYWARD, F. *Mutation analysis*. Rel. Téc. GIT-ICS-79/08, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, 1979.
- AGRAWAL, H.; DEMILLO, R. A.; HATHAWAY, R.; HSU, W.; KRAUSER, E. W.; MARTIN, R. J.; MATHUR, A. P.; SPAFFORD, E. H. *Design of mutant operators for the C programming language*. Rel. Téc. SERC-TR41-P, Software Engineering Research Center, Purdue University, West Lafayette, IN, 1989.
- BARBOSA, E. F. *Uma contribuição para a determinação de um conjunto essencial de operadores de mutação no teste de programas C*. Dissertação de Mestrado, ICMC-USP, São Carlos SP, 1998.
- BARBOSA, E. F.; MALDONADO, J. C.; VINCENZI, A. M. R. Towards the determination of sufficient mutant operators for C. *Software Testing, Verification and Reliability*, v. 11, n. 2, p. 113–136, 2001.
- BUDD, T. A. *Mutation analysis: Ideas, example, problems and prospects*, cap. Computer Program Testing North-Holland Publishing Company, 1981.
- BUDD, T. A.; DEMILLO, R. A.; LIPTON, R. J.; SAYWARD, F. G. Theoretical and empirical studies on using program mutation to test the functional correctness of programs. In: *7th ACM Symposium on Principles of Programming Languages*, New York, NY, p. 220–233, 1980.
- CHAIM, M. L. *Poke-tool – uma ferramenta para suporte ao teste estrutural de programas baseado em análise de fluxo de dados*. Dissertação de Mestrado, DCA/FEEC/UNICAMP, Campinas, SP, 1991.
- CHOI, B. J.; DEMILLO, R. A.; KRAUSER, E. W.; MATHUR, A. P.; MARTIN, R. J.; OFFUTT, A. J.; PAN, H.; SPAFFORD, E. H. The mothra toolset. In: *Twenty-Second Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, HI, 1989.
- COWARD, P. A review of software testing. *Information and Software Technology*, v. 30, n. 3, p. 189–198, 1988.

- DELAMARO, M. E. *Proteum: Um ambiente de teste baseado na análise de mutantes*. Dissertação de Mestrado, ICMC/USP, São Carlos - SP, 1993.
- DELAMARO, M. E. *Mutação de interface: Um critério de adequação inter-procedimental para o teste de integração*. Tese de Doutorado, Instituto de Física de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 1997.
- DELAMARO, M. E.; MALDONADO, J. C. *Uma visão sobre a aplicação da análise de mutantes*. Rel. Téc. 133, ICMC/USP, São Carlos - SP, 1993.
- DELAMARO, M. E.; MALDONADO, J. C. Interface mutation: A case study. In: *Workshop do Projeto de Validação e Teste de Sistemas de Operação*, Águas de Lindóia - SP, p. 191–202, 1997a.
- DELAMARO, M. E.; MALDONADO, J. C. Interface mutation: An approach to integration testing. In: *Workshop do Projeto de Validação e Teste de Sistemas de Operação*, Águas de Lindóia - SP, p. 177–189, 1997b.
- DELAMARO, M. E.; MALDONADO, J. C. Interface mutation: Assessing testing quality at interprocedural level. In: *19th International Conference of the Chilean Computer Science Society (SCCC'99)*, Talca – Chile, p. 78–86, 1999.
- DELAMARO, M. E.; MALDONADO, J. C.; MATHUR, A. P. *Proteum - a tool for the assessment of test adequacy for C programs - user's guide*. Rel. Téc. SERC-TR168-P, Software Engineering Research Center, Purdue University, 1996.
- DELAMARO, M. E.; MALDONADO, J. C.; MATHUR, A. P. Interface mutation: An approach for integration testing. *IEEE Transactions on Software Engineering*, v. 27, n. 3, p. 228–247, 2001.
- DELAMARO, M. E.; MALDONADO, J. C.; VINCENZI, A. M. R. Proteum/IM 2.0: An integrated mutation testing environment. In: *Mutation 2000 Symposium*, San Jose, CA, p. 124–134, 2000.
- DEMILLO, R. A. Mutation analysis as a tool for software quality assurance. In: *COMP-SAC80*, Chicago, IL, 1980.
- DEMILLO, R. A. *Software testing and evaluation*. The Benjamin/Cummings Publishing Company Inc., 1987.
- DEMILLO, R. A.; GWIND, D. S.; KING, K. N.; MCKRAKEN, W. N.; OFFUTT, A. J. An extended overview of the mothra testing environment. In: *Software Testing, Verification and Analysis*, Banff, Canadá, 1988.
- DEMILLO, R. A.; LIPTON, R. J.; SAYWARD, F. G. Hints on test data selection: Help for the practicing programmer. *IEEE Computer*, v. 11, n. 4, p. 34–43, 1978.
- DEMILLO, R. A.; MATHUR, A. P.; WONG, W. E. Some critical remarks on a hierarchy of fault-detecting abilities of test methods. *IEEE Transactions on Software Engineering*, v. SE-21, n. 10, p. 858–860, 1995.

- DEMILLO, R. A.; OFFUTT, A. J. Constraint based automatic test data generation. *IEEE Transactions on Software Engineering*, v. SE-17, n. 9, p. 900–910, 1991.
- DEMILLO, R. A.; OFFUTT, A. J.; MATHUR, A.; WONG, E. Some critical remarks on a hierarchy of the fault-detecting ability of test methods. *IEEE Transactions on Software Engineering*, v. SE-21, n. 10, p. 858–863, 1993.
- FABBRI, S. C. P. F. *A análise de mutantes no contexto de sistemas reativos: Uma contribuição para o estabelecimento de estratégias de teste e validação*. Tese de Doutorado, IFSC-USP, São Carlos - SP, 1996.
- FABBRI, S. C. P. F.; MALDONADO, J. C.; MASIERO, P. C.; DELAMARO, M. E. Análise de mutantes baseada em máquinas de estado finito. In: *XI SBRC – Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, Campinas, SP, p. 407–425, 1993.
- FABBRI, S. C. P. F.; MALDONADO, J. C.; MASIERO, P. C.; DELAMARO, M. E. Mutation analysis testing for finite state machines. In: *5th International Symposium on Software Reliability Engineering (ISSRE'94)*, Monterey - CA, p. 220–229, 1994.
- FABBRI, S. C. P. F.; MALDONADO, J. C.; MASIERO, P. C.; DELAMARO, M. E. Mutation analysis applied to validate specifications based on petri nets. In: *FORTE'95 – 8th IFIP Conference on Formal Descriptions Techniques for Distribute Systems and Communication Protocols*, Montreal, Canadá, p. 329–337, 1995.
- FONDAZZI, L. A. *Estudo de técnicas de teste de regressão baseado em mutação seletiva*. Dissertação de Mestrado, ICMC/USP, São Carlos, SP, 1999.
- FRANKL, F. G. *The use of data flow information for the selection and evaluation of software test data*. Tese de Doutorado, Universidade de New York, New York, NY, 1987.
- FRANKL, P. G.; WEYUKER, E. J. An applicable family of data flow testing criteria. *IEEE Transactions on Software Engineering*, v. 14, n. 10, p. 1483–1498, 1988.
- HALEY, A.; ZWEBEN, S. Development and application of a white box approach to integration testing. *The Journal of Systems and Software*, v. 4, p. 309–315, 1984.
- HARMAN, M.; HIERONS, R.; DANICIC, S. The relationship between program dependence and mutation testing. In: *Mutation 2000 Symposium*, San Jose, CA, p. 15–23, 2000.
- HARROLD, M. J. Testing: A roadmap. In: *22th International Conference on Software Engineering*, painel sobre o futuro da engenharia de software, 2000.
- HARROLD, M. J.; SOFFA, M. L. Selecting and using data for integration test. *IEEE Software*, v. 8, n. 2, p. 58–65, 1991.
- HIERONS, R. M.; HARMAN, M.; DANICIC, S. Using program slicing to assist in the detection of equivalent mutants. *Software Testing, Verification and Reliability*, v. 9, p. 233–262, 1999.
- HORGAN, J. R.; MATHUR, P. Assessing testing tools in research and education. *IEEE Software*, v. 9, n. 3, p. 61–69, 1992.

- HOWDEN, W. E. Theoretical and empirical studies of program testing. *IEEE Transactions on Software Engineering*, v. 4, n. 4, p. 293–298, 1978.
- HOWDEN, W. E. Weak mutation testing and completeness of test sets. *IEEE Transactions on Software Engineering*, v. SE-8, n. 4, p. 371–379, 1982.
- JIN, Z.; OFFUT, A. J. Integration testing based on software couplings. In: *X Annual Conference on Computer Assurance (COMPASS 95)*, Gaithersburg, Maryland, p. 13–23, 1995.
- JORGE, R. F.; PINTO, D. L.; DELAMARO, M. E. Ordenação estocástica aplicada ao teste de mutação para o estabelecimento de estratégias de teste. In: *SINAPE - Simpósio Nacional de probabilidade e Estatística*, artigo em desenvolvimento, 2002a.
- JORGE, R. F.; VINCENZI, A. M. R.; DELAMARO, M. E.; MALDONADO, J. C. Teste de mutação: Estratégias baseadas em equivalência de mutantes para redução do custo de aplicação. In: *CLEI - XXVII Latin-American Conference on Informatics*, Venezuela, artigo completo em CD-ROM, p. 83, 2001.
- JORGE, R. F.; VINCENZI, A. M. R.; DELAMARO, M. E.; MALDONADO, J. C. *Relatório dos operadores de mutação implementados nas ferramentas proteum e proteum/im*. Rel. Téc., ICMC/USP, a ser publicado, 2002b.
- KRAUSE, A.; OLSON, M. *The basics of s and s-plus*. 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 2000.
- LINNENKUGEL, U.; MÜLLERBURG, M. Test data selection criteria for (software) integration testing. In: *First International Conference on Systems Integration*, Morristown, NJ, p. 709–717, 1990.
- MALDONADO, J. C. *Crítérios potenciais usos: Uma contribuição ao teste estrutural de software*. Tese de Doutorado, DCA/FEE/UNICAMP, Campinas, SP, 1991.
- MALDONADO, J. C.; BARBOSA, E. F.; VINCENZI, A. M. R.; DELAMARO, M. E. Evaluation N-selective mutation for C programs: Unit and integration testing. In: *Mutation 2000 Symposium*, San Jose, CA, p. 32–44, 2000.
- MALDONADO, J. C.; CHAIM, M. L.; JINO, M. Arquitetura de uma ferramenta de teste de apoio aos critérios potenciais usos. In: *XXII Congresso Nacional de Informática*, São Paulo, SP, 1989.
- MATHUR, A. P. Performance, effectiveness and reliability issues in software testing. In: *15th Annual International Computer Software and Applications Conference*, Tokio, Japan, p. 604–605, 1991.
- MATHUR, A. P.; WONG, W. E. Evaluation of the cost of alternative mutation strategies. In: *VII Simpósio Brasileiro de Engenharia de Software*, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, p. 320–335, 1993.
- MCCULLAGH, P. Regression models for ordinal data. *Jornal P. Statist Soc.*, v. 42, n. 2, p. 109–142, 1989.

- MCCULLAGH, P.; NELDER, J. A. *Generalized linear models*. 2nd ed. New York: Chapman and Hall, 1990.
- MYERS, G. J. *The art of software testing*. Wiley, New York, 1979.
- OFFUTT, A. J.; CRAFT, W. M. Using compiler optimization technique to detect equivalent mutants. *The Journal of Software Testing, Verification, and Reliability*, v. 4, n. 3, p. 131–154, 1994.
- OFFUTT, A. J.; LEE, A.; ROTHERMEL, G.; UNTCH, R. H.; ZAPF, C. An experimental determination of sufficient mutant operators. *ACM Transactions on Software Engineering Methodology*, v. 5, n. 2, p. 99–118, 1996a.
- OFFUTT, A. J.; LEE, S. An empirical evaluation of weak mutation. *IEEE Transactions on Software Engineering*, v. SE-20, n. 5, p. 337–344, 1994.
- OFFUTT, A. J.; PAN, A. J. Automatically detecting mutants and infeasible paths. *The Journal of Software Testing, Verification, and Reliability*, v. 7, n. 3, p. 165–192, 1997.
- OFFUTT, A. J.; PAN, A. J.; TEWARY, K.; ZHANG, T. An experimental evaluation of data flow and mutation testing. *Software Practice and Experience*, v. 26, n. 2, p. 165–176, 1996b.
- OFFUTT, A. J.; ROTHERMEL, G.; ZAPF, C. An experimental evaluation of selective mutation. In: *15th International Conference on Software Engineering*, Baltimore, MD, p. 100–107, 1993.
- PRESSMAN, R. S. *Software engineering - a practitioner's approach*. 5 ed. McGraw-Hill, 2000.
- RAPPS, S.; WEYUKER, E. J. Data flow analysis techniques for program test data selection. In: *6th International Conference on Software Engineering*, Tokio, Japan, p. 272–278, 1982.
- RAPPS, S.; WEYUKER, E. J. Selecting software test data using data flow information. *IEEE Transactions on Software Engineering*, v. SE-11, n. 4, p. 367–375, 1985.
- SIMÃO, A. S. *Proteum-RS/PN: Uma ferramenta para a validação de redes de petri baseada na análise de mutantes*. Dissertação de Mestrado, ICMC/USP, São Carlos, SP, 2000.
- SOUZA, S. R. S. *Avaliação do custo e eficácia do critério análise de mutantes na atividade de teste de programas*. Dissertação de Mestrado, ICMC/USP, São Carlos - SP, 1996.
- SRIDHANAN, B.; MUNDKUR, S.; MATHUR, A. P. Non-intrusive testing, monitoring and control of distributed corba objects. In: *TOOLS'33 – 33rd International Conference on Technology of Object-Oriented Languages*, Mont-saint-Michel, France, p. 195–206, 2000.
- SUGETA, T. *Proteum-rs/st : Uma ferramenta para apoiar a validação de especificações state-charts baseada na análise de mutantes*. Dissertação de Mestrado, ICMC-USP, São Carlos, SP, 1999.
- VILELA, P. R. S.; MALDONADO, J. C.; JINO, M. Data flow based integration testing. In: *VI Simpósio Brasileiro de Engenharia de Software*, Florianópolis, SC, p. 393–409, 1999.

- VINCENZI, A. M. R. *Subídios para o estabelecimento de estratégias de teste baseadas na técnica de mutação*. Dissertação de Mestrado, ICMC/USP, São Carlos - SP, 1998.
- VINCENZI, A. M. R.; MALDONADO, J. C.; BARBOSA, E. F.; DELAMARO, M. E. Unit and integration testing strategies for C programs using mutation-based criteria. *Software Testing, Verification and Reliability*, v. 11, n. 4, p. 249–268, (Special Issue: Mutation 2000 - A Symposium on Mutation Testing. Issue Edited by W. Eric Wong), 2001.
- WAH, K. S. H. T. Theoretical insights into the coupling effect. In: *Mutation 2000 Symposium*, San Jose, CA: Kluwer Academic Publishers, p. 84–92, 2000.
- WONG, W. E. *On mutation and data flow*. Tese de Doutorado, Department of Computer Science, Purdue University, W. Lafayette, IN, 1993.
- WONG, W. E.; MALDONADO, J.; DELAMARO, M.; SOUZA, S. A comparison of selective mutation in C and fortran. In: *Workshop do Projeto Validação e Teste de Sistemas de Operação*, Águas de Lindóia, SP, p. 71–80, 1997.
- WONG, W. E.; MALDONADO, J. C.; DELAMARO, M. E.; MATHUR, A. P. Constrained mutation in C programs. In: *8th Brazilian Symposium on Software Engineering*, Curitiba, PR, Brazil, p. 439–452, 1994a.
- WONG, W. E.; MATHUR, A. P. Fault detection effectiveness of mutation and data flow testing. *Software Quality Journal*, v. 4, n. 1, p. 69–83, 1995a.
- WONG, W. E.; MATHUR, A. P. Reducing the cost of mutation testing: An empirical study. *The Journal of Systems and Software*, v. 31, n. 3, p. 185–196, 1995b.
- WONG, W. E.; MATHUR, A. P.; MALDONADO, J. C. Mutation versus all-uses: An empirical evaluation of cost, strength, and effectiveness. In: *International Conference on Software Quality and Productivity*, Hong Kong, p. 258–265, 1994b.
- WOODWARD, M. R. Mutation testing – its origin and evolution. *Information and Software Technology*, v. 35, n. 3, p. 163–169, 1993.
- WOODWARD, M. R.; HALEWOOD, K. From weak to strong, dead or alive? an analysis of some mutation testing issues. In: *Second Workshop on Software Testing, Verification and Analysis*, Banff, Canadá, 1988.