



Universidade Federal do Amazonas
Faculdade de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Verificação de programas C++ baseados no *framework* cross-plataforma Qt

Mário Angel Praia Garcia

Manaus – Amazonas
Abril de 2016

Mário Angel Praia Garcia

Verificação de programas C++ baseados no
framework cross-plataforma Qt

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Automação e Controle.

Orientador: Lucas Carvalho Cordeiro

Mário Angel Praia Garcia

Verificação de programas C++ baseados no
framework cross-plataforma Qt

Banca Examinadora

Prof. Ph.D. Lucas Carvalho Cordeiro – Presidente e Orientador

Departamento de Eletrônica e Computação – UFAM

Prof. D.Sc. Raimundo da Silva Barreto

Instituto de Computação – UFAM

Prof. D.Sc. Tayana Uchôa Conte

Instituto de Computação – UFAM

Manaus – Amazonas

Abril de 2016

À minha mãe, avó e tias.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por ter iluminado meu caminho, minhas decisões e me proporcionado esta oportunidade.

Agradeço à minha mãe, Fátima Tereza Praia Garcia, por estar sempre do meu lado e cujo amor é incondicional. As minhas tias, Letice e Lenice Praia, por me ajudarem em meu crescimento pessoal e incentivo a não desistir dessa jornada e à minha avó, Maria Tereza Praia Soares Lima, por sua paciência, compreensão, ajuda e pelo seu amor.

Agradeço aos meus amigos e colegas de mestrado da UFAM, que me ajudaram diretamente e indiretamente nessa jornada, pelo incentivo e apoio dado.

Agradeço aos amigos e ex-colegas de graduação da UEA, pela amizade e companheirismo.

Agradeço ao Prof. Lucas Cordeiro, pela dedicação, paciência, encorajamento e apoio oferecido para a realização desse trabalho.

Agradeço à equipe do projeto de verificação formal na UFAM, que contribuíram direta e indiretamente para a realização deste trabalho.

“Viver não é necessário. Necessário é criar.”.

Fernando Pessoa (1888-1935)

Resumo

O processo de desenvolvimento de software para sistemas embarcados tem crescido rapidamente, o que na maioria das vezes acarreta em um aumento da complexidade associada a esse tipo de projeto. Como consequência, as empresas de eletrônica de consumo costumam investir recursos em mecanismos de verificação rápida e automática, com o intuito de desenvolver sistemas robustos e assim reduzir as taxas de *recall* de produtos. Além disso, a redução no tempo de desenvolvimento e na robustez dos sistemas desenvolvidos podem ser alcançados através de *frameworks* multi-plataformas, tais como Qt, que oferece um conjunto de bibliotecas (gráficas) confiáveis para vários dispositivos embarcados. Desta forma, este trabalho propõe uma versão simplificada do *framework* Qt, integrado a um verificador baseado nas teorias do módulo da satisfatibilidade, denominado *Efficient SMT-Based Bounded Model Checker* (ESBMC++), o qual verifica aplicações reais que utilizam o Qt, apresentando uma taxa de sucesso de 89%, para os *benchmarks* desenvolvidos. Com a versão simplificada do *framework* Qt proposto, também foi feita uma avaliação utilizando outros verificadores que se encontram no estado da arte para verificação de programas em C++. Dessa maneira, a metodologia proposta se afirma como a primeira a verificar formalmente aplicações baseadas no *framework* Qt, além de possuir um potencial para desenvolver novas frentes para a verificação de código portátil.

Palavras-chave: Modelo Operacional, *Framework* Qt, Verificação Formal, *Bounded Model Checking*.

Abstract

The software development process for embedded systems is getting faster and faster, which generally incurs an increase in the associated complexity. As a consequence, consumer electronics companies usually invest a lot of resources in fast and automatic verification mechanisms, in order to create robust systems and reduce product recall rates. In addition, further development-time reduction and system robustness can be achieved through cross-platform frameworks, such as Qt, which favor the reliable port of software stacks to different devices. Based on that, the present work proposes a simplified version of the Qt framework, which is integrated into a checker based on satisfiability modulo theories (SMT), name as the efficient SMT-based bounded model checker (ESBMC++), for verifying actual Qt-based applications, and presents a success rate of 89%, for the developed benchmark suite. We also evaluate our simplified version of the Qt framework using other state-of-the-art verifiers for C++ programs. It is worth mentioning that the proposed methodology is the first one to formally verify Qt-based applications, which has the potential to devise new directions for software verification of portable code.

Keywords: Operational Model, Qt Framework, Bounded Model Checking, Formal Verification.

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xii
Abreviações	xiii
1 Introdução	1
1.1 Descrição do Problema	2
1.2 Objetivos	3
1.3 Contribuições	4
1.4 Trabalhos relacionados	4
1.5 Organização	7
2 Fundamentação Teórica	8
2.1 ESBMC++	8
2.2 Satisfiability Modulo Theories (SMT)	10
2.3 O <i>Framework</i> Multiplataforma Qt	11
2.4 Resumo	12
3 Metodologia	14
3.1 Introdução	14
3.2 Pré-condições	16
3.3 Pós-condições	18
3.4 Resumo	19
4 Modelo Operacional para <i>containers</i>	20
4.1 Introdução	20

4.2	Linguagem Base	21
4.3	<i>Containers</i> sequenciais	22
4.4	<i>Containers</i> Associativos	23
4.5	Resumo	27
5	Avaliação experimental	28
5.1	Configuração dos Experimentos	28
5.2	Comparação entre solucionadores SMT	29
5.3	Verificação dos resultados para o <i>esbmc-qt</i>	31
5.4	Verificação dos resultados para aplicações reais	36
5.5	Verificação da conformidade de QtOM	38
5.6	Resumo	40
6	Conclusões	43
6.1	Trabalhos Futuros	44
	Referências Bibliográficas	46
A	Publicações	51

Índice de Figuras

2.1	Visão geral da arquitetura do ESBMC++.	9
2.2	Visão geral da estrutura do <i>framework</i> multiplataforma Qt.	12
3.1	Conectando QtOM a ESBMC++.	15
3.2	Fragmento de código da função <i>loadSimulationFile</i> presente no benchmark Geomessage Simulator.	17
3.3	Modelo operacional de <i>setFileName()</i> presente na classe QFile.	17
3.4	Modelo operacional para os métodos <i>open()</i> e <i>isOpen()</i> na classe <i>QIODevice</i> .	19
4.1	Sintaxe da linguagem adaptada, base para a descrição formal dos <i>containers</i> .	21
5.1	Comparação entre solucionadores SMT.	30
5.2	Comparação entre os tempos de verificação em relação a ESBMC++, LLBMC e DIVINE.	34
5.3	Comparação entre a taxa de cobertura em relação a ESBMC++, LLBMC e DIVINE.	35
5.4	Fragmento de código do arquivo principal da aplicação <i>Locomaps</i> .	37
5.5	Modelo operacional para o construtor de <i>QApplication()</i> .	38
5.6	Comparação entre o comportamento de QtCreator e Clang+QtOM para medir a conformidade de QtOM.	40

Índice de Tabelas

5.1	Resultados obtidos da comparação entre ESBMC++ v1.25.4 (usando Boolector como solucionador SMT), LLBMC v2013.1 e DIVINE v3.3.2.	32
-----	---	----

Abreviações

QtOM - *Operational Model Qt*
IU - Interface para Usuário
MO - Modelo Operacional
BMC - *Bounded Model Checking*
SMT - *Satisfiability Modulo Theories*
ESBMC - *Efficient SMT-Based Context-Bounded Model Checker*
VC - *Verification Condition*
GPU - *Graphics Processing Unit*
SAT - *Boolean Satisfiability*
LLBMC - *Low Level Bounded Model Checker*
STL - *Standard Template Library*
CBMC - *C Bounded Model Checker*
GCC - *GNU Compiler Collection*
AST - *Abstract Syntax Tree*
VCG - *Verification Condition Generator*
TMS - *Tiled Map Service*
IREP - *Intermediate Representation*
SSA - *Single Static Assignment*
GUI - *Graphical User Interface*
LIFO - *Last-in First-out*
FIFO - *First-in First-out*
IDE - *Integrated Development Environment*

Capítulo 1

Introdução

A atual disseminação com relação aos sistemas embarcados e sua devida importância está de acordo com a evolução dos componentes de hardware e softwares associados a eles [1]. Na realidade, esses sistemas têm crescido em relação a sua robustez e complexidade, onde se torna visível o uso de processadores com vários núcleos, memórias compartilhadas escaláveis entre outros avançados recursos, de maneira a suprir o crescimento do poder computacional exigido. Neste contexto, o Qt apresenta-se como um poderoso *framework* multi-plataforma para sistemas embarcados, o qual enfatiza a criação de interface para usuário (IU) e o desenvolvimento de aplicações gráficas [2]. No entanto, como a complexidade de tais sistemas tende a crescer, o seu (bom) funcionamento se torna dependente do usuário, dependência que também cresce de forma rápida. Em consequência, a confiabilidade destes sistemas torna-se algo de grande importância no processo de desenvolvimento de dispositivos comerciais e suas aplicações específicas.

Empresas de eletrônica de consumo cada vez investem mais em tempo e esforço para desenvolver alternativas rápidas e baratas referentes à verificação, com o objetivo de verificar a correção de seus sistemas com o intuito de evitar perdas financeiras [3]. Entre as alternativas já existentes, uma das mais eficiente e menos custosa é a abordagem da verificação de modelos [4] [5]. Porém, existem muitos sistemas que não são possíveis de verificá-los de uma maneira automática devido à falta de suporte de certos tipos de linguagens e *frameworks* por parte dos verificadores de código. Por exemplo, o verificador *Java PathFinder* é capaz de verificar códigos em Java baseado em *bytecode* [6], mas não há suporte a verificação (completa) de aplicações Java que utilizam o sistema operacional Android [7]. Na realidade, esta verificação

somente se torna possível se existir uma representação abstrata das bibliotecas associadas, denominada de modelo operacional (MO) que, de forma conservadora, aproxima-se a semântica usada pelo sistema a ser verificado [8].

Essa dissertação identifica as principais características do *framework* Qt e propõe um modelo operacional (MO) que tem como propósito analisar e verificar as propriedades relacionadas de acordo com as suas funcionalidades. Os algoritmos desenvolvidos neste trabalho foram integrados em uma ferramenta de verificação de modelos limitada (do inglês, *Bounded Model Checking* - BMC) baseada nas teorias do módulo da satisfatibilidade (do inglês, *satisfiability modulo theories* - SMT), denominada *Efficient SMT-based Context-Bounded Model Checker* (ESBMC++) [9] [10] [11], a fim de verificar propriedades específicas de programas escritos em Qt/C++. A combinação entre ESBMC e MOs foi aplicada anteriormente para fornecer suporte à verificação de programas escritos em C++, conforme descrito por Ramalho *et al.* [9]. No entanto, na metodologia proposta, um MO é utilizado para identificar elementos do *framework* Qt e verificar propriedades específicas relacionadas a estas estruturas por meio de pré e pós-condições [12].

1.1 Descrição do Problema

A dependência do usuário com relação ao funcionamento correto de sistemas embarcados tende aumentando rapidamente. Isto ocorre, devido à importância que esses sistemas adquiriram ao longo do tempo de acordo com a evolução dos componentes de hardware e softwares associados a estes. Como consequência, erros tendem a se tornar presente nesses sistemas, devido a problemas no projeto ou na implementação de falhas no hardware/software desenvolvido, mesmo que a detecção de falhas e a proteção do hardware possam ter sido analisados e modelados de forma rigorosa. O nível de robustez e complexidade desses sistemas também têm aumentado, exigindo processadores mais eficientes, memórias com maiores capacidades e interfaces de usuário que garantem ao usuário destes sistemas uma boa usabilidade, assim como, uma boa confiabilidade, aspecto que possui grande importância no processo de desenvolvimento destes sistemas. A partir desse contexto, o *framework* multiplataforma Qt surge como forte e eficaz ferramenta, o qual possui como foco principal a criação de interface para usuário (IU) [2], assim como, o desenvolvimento de aplicações para dispositivos móveis(ou não). Por isso, o problema a ser tratado por essa dissertação está relacionado à verificar aplicações

para dispositivos móveis(ou não) que utilizam o *framework* multiplataforma Qt com interesse nas falhas existentes nessas aplicações. Cada aplicação requer métodos de programação específicos e a natureza crítica dessas aplicações necessitam de mecanismos de proteção de falha e certificação, a fim de reduzir as falhas existentes com o intuito de garantir a confiabilidade destes sistemas, evitando perdas financeiras.

Cada vez mais, empresas que possuem como atividade principal o desenvolvimento de sistemas embarcados, designam seu tempo e esforços a desenvolver novas alternativas de verificação que sejam rápidas, baratas e possuam como objetivo garantir a confiabilidade dos sistemas desenvolvidos, assim como, evitar grandes perdas financeiras [3]. Entre as técnicas existentes, a abordagem através da verificação de modelos é considerada a de menor custo e a mais eficiente mas nem sempre é possível utilizá-la devido as particularidades que cada sistema possui [4, 5]. Por exemplo, o verificador *ESBMC-GPU* é capaz somente de verificar códigos de GPUs que se utilizam da linguagem CUDA, a partir de uma representação abstrata das bibliotecas associadas a ele, mas não possui suporte a qualquer outro tipo de linguagem utilizada por outros tipos de GPUs [13]. Como já mencionado, a representação abstrata têm como objetivo aproximar-se de forma semântica ao usado pelo sistema a ser analisado [8].

1.2 Objetivos

O objetivo geral dessa dissertação é aplicar a técnica de verificação de modelos limitados para analisar aplicações que utilizam o *framework* multiplataforma Qt, usando ferramentas de verificação para validar a taxa de cobertura e o comportamento da metodologia proposta, quando comparada com a documentação existente do *framework* utilizado.

Os objetivos específicos são listados a seguir:

- Modularizar e estender o modelo operacional QtOM que oferece estritamente o mesmo comportamento do *framework* Qt com foco na verificação de suas propriedades.
- Analisar as aplicações que utilizam o *framework* Qt contidas no conjunto de *benckmarks* com foco em duas propriedades base: acesso de memória e manipulação de dados.
- Aplicar a metodologia de verificação proposta em aplicações reais que utilizam o *framework* Qt.

1.3 Contribuições

Este trabalho é uma extensão de artigos já publicados anteriormente [9, 12]. O respectivo modelo operacional (MO) proposto foi ampliado com o objetivo de incluir novas funcionalidades dos principais módulos do Qt, neste caso em particular, *QtGui* e *QtCore*. De fato, as principais contribuições aqui são:

- Suportar *containers* baseados em templates sequenciais e associativos.
- Avaliar o desempenho de três solucionadores SMT (Z3 [18], Yices [19] e Boolector [20]) juntamente com a abordagem proposta utilizando o conjunto de *benchmarks* (esbmc-qt) extensivamente revisado e ampliado em relação ao trabalho anterior [12].
- Integrar o modelo operacional proposto denominado QtOM ao processo de verificação de programas em C++ de verificadores que se encontram no estado da arte, neste caso, DIVINE [14] e LLBMC [15]
- Fornecer suporte à verificação de duas aplicações reais que utilizam Qt denominadas Locomaps [16] e Geomessage [17], respectivamente.
- Avaliar o modelo operacional proposto com o intuito de analisar seu nível de conformidade em relação ao *framework* analisado.

Por fim, foram incluídas representações para todas as bibliotecas relacionadas as classes de Qt *containers*. De acordo com o conhecimento atual em verificação de software, não há outro verificador que utilize modelos e se aplique técnicas BMC para verificar programas baseados no *framework* Qt sobre dispositivos de eletrônica de consumo.

1.4 Trabalhos relacionados

De acordo com a atual literatura sobre verificação, não existe outro verificador disponível que seja capaz de verificar funcionalidades do *framework* Qt. Ao contrário, as aplicações de eletrônica de consumo que utilizam este *framework*, apresentam diversas propriedades que devem ser verificadas como estouro aritmético, segurança de ponteiros, limite de vetores e correteza no uso de *containers*. A técnica BMC aplicada em verificação de software é usada em

diversos verificadores [11, 15, 21, 22] e está se tornando cada vez mais popular, principalmente, devido ao aumento de solucionadores SMT cada vez mais sofisticados, os quais são baseados em eficientes solucionadores de satisfação Booleana (do inglês, *Boolean Satisfiability* - SAT) [18].

Ramalho *et al.* [9] apresentam o *Efficient SMT-Based Context-Bounded Model Checker* (ESBMC) como um verificador de modelos limitados para verificar programas em C++, sendo denominado ESBMC++. ESBMC++ utiliza seus modelos operacionais para oferecer suporte à verificação das características mais complexas que a linguagem oferece, como *containers* e tratamento de exceção. Vale ressaltar que os modelos usados são uma representação abstrata das bibliotecas padrões do C++, que de forma conservadora se aproximam semanticamente das bibliotecas originais. ESBMC++ se utiliza disso para codificar as condições de verificação criadas usando diferentes teorias de base apoiadas por solucionadores SMT.

Merz, Falke e Sinz [15] apresentam o *Low-Level Bounded Model Checker* (LLBMC) como um verificador que utiliza modelos operacionais para verificar programas baseados em ANSI-C/C++. LLBMC também usa um compilador denominado *low level virtual machine* (LLVM) que possui o objetivo de converter programas ANSI-C/C++ em uma representação intermediária utilizada pelo verificador. De forma semelhante ao ESBMC++, Merz, Falke e Sinz também utilizam solucionadores SMT para analisar as condições de verificação. Contudo, diferente da abordagem aqui proposta, o LLBMC não suporta tratamento de exceção, o que acarreta numa verificação incorreta de programas reais escritos em C++, como por exemplo, programas baseados em *Standard Template Libraries* (STL). Vale ressaltar que a representação intermediária usado pelo LLVM perde algumas informações sobre a estrutura original dos respectivos programas em C++ , como por exemplo, as relações entre classes.

Barnat *et al.* apresentam o DIVINE [14] como um verificador de modelo de estado explícito para programas ANSI-C/C++ sequencias e multi-tarefas, o qual possui como objetivo principal verificar a segurança de propriedades de programas assíncronos e aqueles que utilizam memória compartilhada. DIVINE faz uso de um compilador denominado Clang [23] como *front-end*, a fim de converter programas C++ em uma representação intermediária utilizada por LLVM, que logo em seguida realiza a verificação sobre o *bytecode* produzido. DIVINE também possui uma implementação de ANSI-C e das bibliotecas padrões do C++, o que lhe permite verificar programas desenvolvidos com essas linguagens. De acordo com essa abordagem, o DIVINE é capaz de criar um programa que possa ser interpretado totalmente por LLVM e logo

em seguida ser verificado.

Blanc, Groce e Kroening descrevem a verificação de programas em C++ que usam *containers* STL através de abstração de predicados [24], com o uso de tipo de dados abstrato, sendo usados para realizar a verificação de STL ao invés de usar a implementação real dos componentes STL. Na verdade, os autores mostram que a corretude pode ser realizada através de modelos operacionais, provando que a partir de condições prévias sobre operações, no mesmo modelo, acarreta em condições prévias nas bibliotecas padrões, e pós-condições podem ser tão significativas quanto as condições originais. Tal abordagem é eficiente em encontrar erros triviais em programas em C++, mas que necessita de uma pesquisa mais profunda para evitar erros e operações enganosas (isto é, ao envolver a modelagem de métodos internos). Vale ressaltar que, no presente trabalho, simulações do comportamento de certos métodos e funções superam o problema mencionado (ver Seção 3.2).

O *C Bounded Model Checker* (CBMC) implementa a técnica BMC para programas ANSI-C/C++ por meio de solucionadores SAT/SMT [21]. Vale ressaltar que o ESBMC foi construído a partir do CBMC, portanto, ambos verificadores possuem processos de verificação parecidos. Na verdade, o CBMC processa programas C/C++ usando a ferramenta goto-cc [25], a qual compila o código fonte da aplicação para um *GOTO-program* equivalente (ou seja, um grafo de fluxo de controle), a partir de um modelo compatível ao GCC. A partir de *GOTO-program*, o CBMC cria uma árvore abstrata de sintaxe (do inglês, *Abstract Syntax Tree* - AST) que é convertida em um formato independente da linguagem interna usada para as etapas restantes. O CBMC também utiliza duas funções recursivas \mathcal{C} e \mathcal{P} que registram as *restrições* (ou seja, premissas e atribuições de variáveis) e as *propriedades* (ou seja, condições de segurança e premissas definidas pelo usuário), respectivamente. Este verificador cria de forma automática as condições de segurança que verificam o estouro aritmético, violação no limite dos vetores e checagem de ponteiro nulo [26]. Por fim, um gerador de condições de verificação (do inglês, *Verification Condition Generator* - VCG) cria condições de verificação (do inglês, *Verification Conditions* - VCs) a partir das fórmulas criadas e os envia para um solucionador SAT/SMT. Embora o CBMC esteja relacionado como susposto verificador de programas em C++, Ramalho *et al.* [9] e Merz *et al.* [27] relatam que o CBMC falha ao verificar diversas aplicações simples em C++, o que também foi confirmado neste trabalho (ver Seção 5.3).

Finalmente, destaca-se que o QtOM foi completamente escrito na linguagem de programação C++, o que facilita a integração dentro de processos de verificação de outros verifi-

cadores. No presente trabalho, o QtOM não foi somente intregado ao ESBMC++, mas também no DIVINE [14] e LLBMC [15], afim de obter uma avaliação sobre a abordagem proposta.

1.5 Organização

Neste capítulo, inicialmente descreveram-se sobre o contexto que envolve o trabalho, a motivação, seus objetivos, além de terem sido apresentados trabalhos relacionados de acordo com a abordagem proposta, com o intuito de descrever referências sobre o tema proposto. Este trabalho está organizado da seguinte forma:

- O Capítulo 2 apresenta uma breve introdução sobre a arquitetura do ESBMC++ e as teorias do módulo da satisfatibilidade (SMT), além de descrever um resumo sobre o *framework* multiplataforma Qt;
- O Capítulo 3 descreve uma representação simplificada das bibliotecas Qt, nomeado como *Qt Operational Model* (QtOM), que também aborda pré e pós-condições.
- O Capítulo 4 descreve a implementação formal de *Qt Containers* associativos e sequências desenvolvidos de forma detalhada.
- O Capítulo 5 descreve os resultados experimentais realizados usando *benchmarks* Qt/C++ e também a verificação de duas aplicações baseadas em Qt, onde a primeira apresenta imagens de satélites, terrenos, mapas de ruas e *Tiled Map Service* (TMS) *panning* entre outras características [16] e a segunda aplicação cria um *broadcast User Datagram Protocol* (UDP) baseado em arquivos XML.
- Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões, destacando a importância da criação de um modelo para verificar aplicações que utilizam o *framework* Qt, assim como, os trabalhos futuros também são descritos.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Este capítulo descreve a arquitetura do ESBMC++ e algumas características estruturais do *framework* multiplataforma Qt. Este trabalho consiste na verificação de programas escritos em C++ baseados no *framework* multiplataforma Qt, usando a ferramenta ESBMC++, a qual possui um *front-end* baseado no CBMC com o intuito de produzir VCs para um programa Qt/C++. No entanto, em vez de passar tais VCs para um solucionador SAT, o ESBMC++ os codifica por meio de diferentes teorias de base do SMT e em seguida, passa as fórmulas associadas para um solucionador SMT.

2.1 ESBMC++

O ESBMC++ é um *context-bounded model checker* baseado em solucionadores SMT para verificar programas ANSI-C/C++ [9, 10, 11, 28]. A Figura 2.1 apresenta a arquitetura do ESBMC++. Em especial, o ESBMC++ verifica programas sequencias e multi-tarefas e analisa propriedades relacionadas à estouro aritmético, divisão por zero, índices de vetor fora do limite, segurança de ponteiros, bloqueio fatal e corrida de dados. No ESBMC++, o processo de verificação se encontra totalmente automático, isto é, todos os processos realizados são representados nas caixas cinzas de acordo com a Figura 2.1 [29, 30].

Durante o processo de verificação, primeiramente é realizado o *parser* do código fonte a ser analisado. Na verdade, o *parser* utilizado no ESBMC++ é fortemente baseado no compilador GNU C++ [9], uma vez que a abordagem permite que o ESBMC++ encontre a maioria dos erros de sintaxe já relatados pelo GCC. Programas ANSI-C/C++/Qt são convertidos em

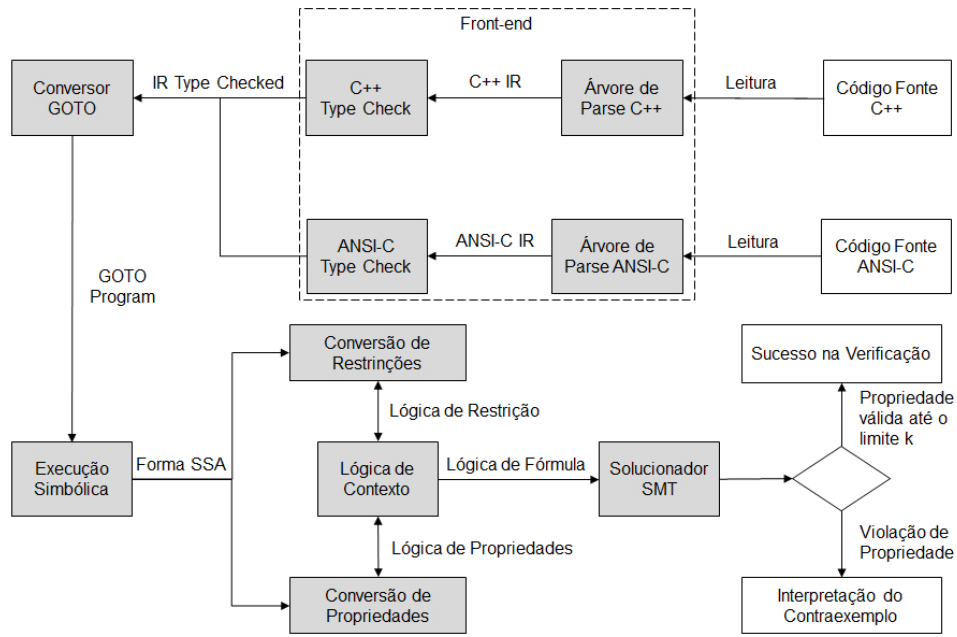


Figura 2.1: Visão geral da arquitetura do ESBM++.

uma árvore de representação intermediária (do inglês, *Intermediate Representation* - IRep), e boa parte dessa representação criada é usada como base para os passos restantes da verificação. Vale ressaltar que o modelo operacional (MO) é o ponto chave neste processo de conversão, o que será explicado no Capítulo 3.

Na etapa seguinte, denominada *type-checking*, verificações adicionais são realizadas, na árvore IRep, que incluem atribuições, *type-cast*, inicialização de ponteiros e a análise das chamadas de função, assim como, a criação de *templates* e instanciações [9]. Em seguida, a árvore IRep é convertida em expressões *goto* que simplificam a representação das instruções (por exemplo, a substituição de *while* por *if* e instruções *goto*) e são executadas de forma simbólica pelo *GOTO-symex*. Como resultado, uma atribuição estática única (do inglês, *Single Static Assignment* - SSA) é criada. Baseado nisso, o ESBM++ cria duas fórmulas chamadas *restrições* (ou seja, premissas e atribuições de variáveis) e *propriedades* (ou seja, condições de segurança e premissas definidas pelo usuário) consideradas funções recursivas. Essas fórmulas acumulam predicados de fluxo de controle de cada ponto do programa analisado e os usa para armazenar restrições (fórmula \mathcal{C}) e propriedades (fórmula \mathcal{P}), de modo que reflita adequadamente a semântica do programa. Posteriormente, essas duas fórmulas de lógica de primeira ordem são verificadas por um solucionador SMT.

Por fim, se uma violação em alguma propriedade for encontrada, um contraexemplo é gerado pelo ESBM++ [31], o qual atribui valores às variáveis de programa com o intuito

de reproduzir o erro encontrado. De fato, contraexemplos possuem grande importância para o diagnóstico e a análise da execução do programa, dado que as violações encontradas pode ser sistematicamente rastreadas [32].

2.2 Satisfiability Modulo Theories (SMT)

SMT determina a satisfatibilidade das fórmulas expressas em lógica de primeira ordem, usando uma combinação de suas teorias, a fim de generalizar a satisfatibilidade proposicional, dando suporte às funções não interpretadas, aritmética linear e não linear, vetores de bit, tuplas, *arrays* e outras teorias de primeira ordem. Dado uma teoria \mathcal{T} e uma fórmula livre de quantificadores ψ , a respectiva fórmula é satisfatível \mathcal{T} se e somente se existir uma estrutura que satisfaça tanto a fórmula quanto as sentenças de \mathcal{T} , ou seja, se $\mathcal{T} \cup \{\psi\}$ é satisfatível [33]. Dado um conjunto $\Gamma \cup \{\psi\}$ das fórmulas sobre \mathcal{T} , ψ é uma consequência \mathcal{T} de Γ ($\Gamma \models_{\mathcal{T}} \psi$) se e somente se todo os modelos de $\mathcal{T} \cup \Gamma$ é também um modelo de ψ . Desta forma, ao verificar $\Gamma \models_{\mathcal{T}} \psi$ pode se reduzi-la para verificação de um satisfatível \mathcal{T} de $\Gamma \cup \{\neg\psi\}$.

A partir do contexto descrito, as teorias de *arrays* dos solucionadores SMT são normalmente baseadas em axiomas de McCarthy [34]. A função $select(a, i)$ indica o valor de a no índice i e a função $store(a, i, v)$ indica um vetor que é exatamente o mesmo que a , a menos que o valor do índice i seja v . Formalmente, $select$ e $store$ pode então ser caracterizados por axiomas [18, 20, 35]

$$i = j \Rightarrow select(store(a, i, v), j) = v$$

e

$$i \neq j \Rightarrow select(store(a, i, v)) = select(a, j).$$

Tuplas são utilizadas para modelar *union* e *struct* em ANSI-C, além de fornecer as operações de *store* e *select*, as quais são semelhantes as usadas em vetores. No entanto, elas trabalham com elementos de tupla, isto é, cada campo de uma tupla é representado por uma constante inteira. Desta forma, a expressão $select(t, f)$ indica o campo f de uma tupla t , enquanto a expressão $store(t, f, v)$ indica uma tupla t que, no campo f , tem o valor v . A fim de analisar a

satisfabilidade de uma determinada fórmula, solucionadores SMT lidam com termos baseados em suas teorias usando um procedimento de decisão [36].

2.3 O *Framework* Multiplataforma Qt

Diversos módulos de software, conhecidos como *frameworks*, têm sido utilizados para acelerar o processo de desenvolvimento de aplicações. Diante desse contexto, o *framework* multiplataforma Qt [2] representa um bom exemplo de um conjunto de classes reutilizáveis, onde a engenharia de software presente é capaz de favorecer o desenvolvimento de aplicações gráficas que utilizam C++ [2] e Java [37]. São fornecidos programas que são executados em diferentes plataformas tanto de hardware quanto de software com o mínimo de mudanças nas aplicações desenvolvidas com o objetivo de manter o mesmo desempenho. Samsung [38], Philips [39] e Panasonic [40] são algumas das empresas presentes na lista top 10 da Fortune 500 que utilizam Qt para o desenvolvimento de suas aplicações [2].

De acordo com o relatório do *Cross-Platform Tool Benchmarking* 2014 [41], Qt é o *framework* multiplataforma que lidera o desenvolvimento de aplicações para dispositivos e interfaces para usuários. Com as suas bibliotecas organizadas em módulos, conforme mostrado na Figura 2.2, o módulo *QtCore* [2] é considerado um módulo base de Qt pois, contém todas as classes não gráficas das classes *core* e em particular contém um conjunto de bibliotecas denominado de classes *Containers* que possui como implementação um modelo base para esses tipos de classe, com um intuito de uso geral ou como uma alternativa para *containers* STL. Esses tipos de estruturas são amplamente conhecidos e usados em aplicações reais com Qt e consistem em um item muito importante nos processos de verificação.

Além desses submódulos, o *QtCore* também contém um sistema de eventos denominado Qt *Event*, onde, Qt representa um evento por meio de um objeto que herda a classe *QEvent* (classe base para o sistema Qt *Event*) na qual contém informações necessárias sobre todas as ações (internas ou externas) relacionadas a uma dada aplicação. Uma vez instanciado, este objeto é enviado para uma instância da classe *QObject*, o qual possui como função chamar um método escalonador apropriado para o seu tipo.

Desta forma, o *framework* multiplataforma Qt fornece uma completa abstração para aplicações que envolvem interface gráfica com o usuário (do inglês, *Graphical User Interface* - GUI) usando APIs nativas, a partir das diferentes plataformas operacionais disponíveis no

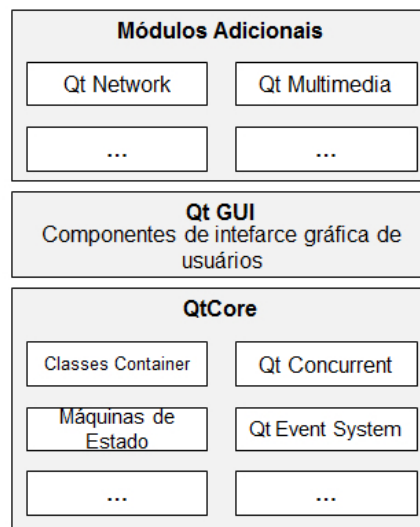


Figura 2.2: Visão geral da estrutura do *framework* multiplataforma Qt.

mercado, para consultar as métricas e desenhar os elementos gráficos. Também são oferecidos *signals* e *slots* com o objetivo de realizar a comunicação entre os objetos criados [42]. Outra característica importante a ser ressaltada deste *framework* é a presença de um compilador denominado *MetaObject*, o qual é responsável por interpretar os programas criados e gerar um código em C++ com meta informações [43].

Por fim e de acordo com o apresentado, nota-se que a complexidade e robustez de programas que utilizam o *framework* multiplataforma Qt afeta diretamente os processos de verificação relacionados a eles. Em resumo, o QtOM possui uma representação de todas as classes acima referidas e suas respectivas interações a fim de suportar também todo o sistema Qt *Event*.

2.4 Resumo

Neste capítulo, foi descrito a arquitetura de ESBMC++ sendo explicado o objetivo e a tarefa de cada etapa de seu processo de verificação de acordo com a Figura 2.1, descreveu-se também como as técnicas SMT são usadas para determinar a satisfatibilidade das fórmulas expressas em lógica de primeira ordem e por fim, foi descrito algumas características estruturais do *framework* multiplataforma Qt que de acordo com a Figura 2.2, mostra as suas bibliotecas organizadas em módulos a qual, destaca-se o módulo *QtCore* [2] como um módulo base onde, estão as classes não gráficas e contém um conjunto de bibliotecas denominado de classes *Containers*. Essas estruturas são amplamente conhecidas e usadas em aplicações reais com Qt e

consistem em um item muito importante nos processos de verificação. O módulo *QtGui* também é descrito pois, fornece uma completa abstração para aplicações que envolvem interface gráfica usando APIs nativas, outra característica importante a ser ressaltada é a presença do compilador chamado *MetaObject* [43]. Como resultado, o conteúdo apresentado nesse capítulo fornece todo o embasamento necessário para compreensão da ferramenta, técnica SMT e o *framework* utilizado neste trabalho.

Capítulo 3

Metodologia

Este capítulo descreve todo o processo de verificação com o ESBMC++ que apenas possui suporte a verificação de programas ANSI-C/C++ que juntamente ao modelo operacional proposto (QtOM), torna possível a verificação de programas que utilizam o *framework* multiplataforma Qt escritos em C++, apesar dos códigos analisados utilizarem essa linguagem de programação, o *framework* também possui bibliotecas nativas com estruturas hierárquicas e complexas o que poderia afetar desnecessariamente as VCs não havendo qualquer afirmação acerca de propriedades específicas analisadas durante o processo de verificação. Por fim, é descrito como QtOM se utiliza de pré e pós-condições para se obter o mesmo comportamento descrito na documentação oficial do *framework* [2].

3.1 Introdução

Inicialmente, o *parser* utilizado já havia sido mencionado na Seção 2.1 do Capítulo 2 e nesta etapa é onde o ESBMC++ transforma o código de entrada em uma árvore IRep, a qual, possui todas as informações necessárias para o processo de verificação e, ao fim desta etapa, o ESBMC++ identifica cada estrutura presente no respectivo programa. No entanto, o ESBMC++ suporta apenas a verificação de programas ANSI-C/C++. Apesar dos códigos analisados do Qt serem escritos em C++, suas bibliotecas nativas possuem muitas estruturas hierárquicas e complexas. Desta maneira, o processo de verificação para essas bibliotecas e suas respectivas implementações otimizadas afetariam de forma desnecessária as VCs, além do mais poderiam não conter qualquer afirmação a cerca de propriedades específicas, tornando a

verificação uma tarefa inviável.

O uso do QtOM proposto neste capítulo possui como objetivo solucionar o problema descrito acima, por ser uma representação simplificada, a qual considera a estrutura de cada biblioteca e suas respectivas classes associadas, incluindo atributos, assinaturas de métodos, protótipos de funções e assertivas, garantindo assim que cada propriedade seja formalmente verificada. Na verdade, existem muitas propriedades a serem verificadas como acesso de memória inválida, valores negativos que representam períodos de tempo, acesso à arquivos inexistentes e ponteiros nulos, juntamente com pré e pós-condições que são necessárias para executar corretamente os métodos do Qt. Vale ressaltar que QtOM é ligado de forma manual ao ESBMC++, logo no início do processo de verificação, como mostrado na Figura 3.1. Desta forma, o QtOM pode auxiliar no processo de *parser* durante a criação de uma representação intermediária em C++ que possui todas as assertivas indispensáveis para a verificação das propriedades mencionadas acima. Por fim, o fluxo de verificação segue de maneira tradicional.

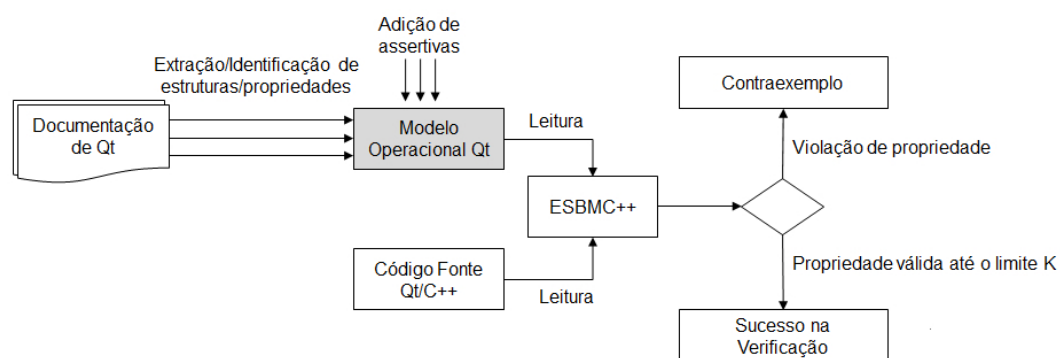


Figura 3.1: Conectando QtOM a ESBMC++.

Comparando com [12], o qual possui uma versão de QtOM não modularizada por tipos de classes e o suporte ao *framework* Qt era de forma básica. Inicialmente, neste trabalho foi feita uma modularização em QtOM. Os módulos *QtCore* e *QtGui* continuam presentes como módulos principais mas também foram adicionados outros três módulos (*QtDeclarative*, *QtWidgets*, *QtNetwork*) com o objetivo de aumentar o suporte do modelo operacional proposto possibilitando assim a sua aplicação na análise de aplicações reais. Internamente foram criadas representações de todas classes pertencentes a esses módulos com um total de 261 representações, assim como um suporte específico e completo à todas as classes *container* do *framework* Qt que também são amplamente utilizadas em aplicações reais.

3.2 Pré-condições

Ao se utilizar modelos simplificados é possível diminuir a complexidade que é associada as árvores IRep. Desta forma, o ESBMC++ é capaz de construir árvores IRep de uma forma muito rápida, com baixa complexidade, mas que englobam todas as propriedades necessárias para a verificação dos programas desejados. Além disso, o uso de assertivas se torna indispensável para verificar propriedades relacionadas aos métodos do *framework* multiplataforma Qt, assim como, as suas respectivas execuções que não são contempladas pelas bibliotecas padrões. Deste modo, tais assertivas são integrados aos respectivos métodos com o objetivo de detectar violações em relação ao uso incorreto do *framework* Qt.

Em resumo, baseado na adição de assertivas, ESBMC++ é capaz de verificar propriedades específicas contidas em QtOM e identificar como pré-condições partes das propriedades relacionadas, ou seja, as propriedades que devem ser mantidas de forma que haja uma execução correta de um determinado método ou função. Por exemplo, a abordagem proposta pode verificar se um parâmetro, que representa uma determinada posição dentro de uma vetor é maior ou igual a zero.

De acordo com o fragmento de código mostrado na Figura 3.2 que pertence a aplicação chamada *GeoMessage Simulator*. Esta aplicação fornece mensagens para componentes do sistema na plataforma ArcGIS [17]. Como mostrado, o método `setFileName()` manipula uma pré-condição (veja linha 6), onde `m_inputFile` é um objeto da classe `QFile` que proporciona uma interface de leitura e escrita para se manipular arquivos [2]. Ao ser definido um nome ao arquivo, o objeto `fileName` da `QString` não pode ser nulo. Desta forma, quando `setFileName()` é chamado, o ESBMC++ interpreta o seu comportamento de acordo com o implementado em QtOM como mostrado na Figura 3.3.

A Figura 3.3 mostra um trecho do modelo operacional correspondente à classe `QFile` com uma implementação de `setFileName()` (veja as linhas 5-10), onde apenas as pré-condições são verificadas. Em particular, se o objeto `QString` passado como um parâmetro não estiver vazio (veja a linha 6), a operação é válida e, conseqüentemente, a premissa assumida é considerada *verdadeira*. Caso contrário, se uma operação incorreta for realizada, como uma *string* vazia for passada como parâmetro, a premissa assumida é considerada *falsa*. Nesse caso, o ESBMC++ retornaria um contraexemplo com todos os passos necessários para reproduzir a execução de tal violação, além de descrever o erro da respectiva premissa violada.

```

1 QString loadSimulationFile( const QString &
    fileName )
2 {
3     if( m_inputFile.isOpen() )
4         m_inputFile.close();
5
6     m_inputFile.setFileName(fileName);
7
8     //Check file for at least one message
9     if( !doInitialRead() )
10    {
11        return QString(m_inputFile.fileName() +
            "is an empty message file");
12    }
13    else
14    {
15        return NULL;
16    }
17 }

```

Figura 3.2: Fragmento de código da função *loadSimulationFile* presente no benchmark Geomessage Simulator.

```

1 class QFile {
2 ...
3     QFile( const QString &name ) {
4         ... }
5
6     void setFileName( const QString &
7         name ){
8         __ESBMC_assert( !name.isEmpty
9             (), "The string must not be
10            empty" );
11         __ESBMC_assert( !this->isOpen
12             (), "The file must be
13            closed" );
14     }
15     ...
16 };

```

Figura 3.3: Modelo operacional de *setFileName()* presente na classe *QFile*.

Do ponto de vista da verificação de software, existem métodos/funções que também não apresentam qualquer propriedade a ser verificada como aqueles cuja única finalidade é imprimir valores na tela. Dado que ESBMC++ realiza o processo verificação a nível de software ao invés de testar o hardware, a corretude a cerca do valor impresso na tela não foi abordado neste trabalho. Por fim, para tais métodos só existem assinaturas, de modo que o verificador

proposto seja capaz de reconhecer a estrutura desejada para que durante o processo de análise seja construído uma árvore IRep confiável. No entanto, eles não apresentam qualquer modelagem (corpo de função), uma vez que não exista nenhuma propriedade a nível de software a ser verificada.

3.3 Pós-condições

Em aplicações reais existem métodos que não contêm apenas propriedades que serão tratadas como pré-condição, mas também serão considerados como pós-condições [12, 44]. Por exemplo, de acordo com a documentação do Qt [2], a função *setFileName* conforme descrita na Seção 3.2 não deve ser utilizada se o respectivo arquivo já estiver sendo utilizado, o que é verificado em seu código fonte a partir da estrutura *if* presente nas linhas 3 e 4 visto na Figura 3.2.

No entanto, a execução da instrução presente na linha 4 (veja Fig. 3.2) seria não determinística para o ESBMC++, assim como, a assertiva presente na linha 8 do modelo operacional associado, como mostrado na Figura 3.3, uma vez que não há como se afirmar se o respectivo arquivo está sendo utilizado ou não. Desta forma, é evidente que será necessário simular o comportamento do método *isOpen()* com o intuito de verificar de forma coerente as propriedades relacionadas com manipulação de arquivos. Como a classe *QFile* indiretamente herda os métodos *open()* e *isOpen()*, a partir da classe *QIODevice*, para simulações comportamentais desses métodos constrói-se um modelo operacional para *QIODevice* conforme mostrado na Figura 3.4.

Por fim, todos os métodos que resultam em uma condição que deve ser mantida, a fim de permitir uma adequada execução de futuras instruções, devem apresentar uma simulação do seu comportamento. Consequentemente, um determinado modelo operacional deve seguir de forma rigorosa as especificações descritas na documentação oficial do *framework* [2] com o objetivo de se obter o mesmo comportamento, assim como, incluir mecanismos necessários à verificação do código. Como resultado, é necessário verificar o nível de equivalência entre o modelo operacional e a biblioteca original, com o intuito de se comparar o comportamento de ambos, tendo em vista que os modelos operacionais desenvolvidos são uma cópia simplificada das bibliotecas originais com todos os mecanismos necessários para a verificação do código [13].

```

1 class QIODevice {
2     ...
3     bool QIODevice::open(OpenMode
4         mode){
5         this->__openMode = mode;
6         if (this->__openMode ==
7             NotOpen)
8             this->__isOpen = false;
9             this->__isOpen = true;
10    }
11    bool isOpen() const{
12        return this->__isOpen;
13    }
14    ...
15 private:
16     bool __isOpen;
17     OpenMode __openMode;
18     ...
19 };

```

Figura 3.4: Modelo operacional para os métodos *open()* e *isOpen()* na classe *QIODevice*.

3.4 Resumo

Neste capítulo, foi descrito como é realizado o processo de verificação com ESBMC++ junto com o modelo operacional proposto (QtOM) de acordo como mostrado na figura 3.1, logo em seguida, é descrito como o modelo operacional proposto se utiliza de pré-condições para identificar partes das propriedades relacionadas ao *framework* multiplataforma Qt, para que um determinado método ou função seja executado de forma correta. Por fim, descreve-se como QtOM usa pós-condições para garantir o mesmo comportamento de métodos ou funções, a serem analisados, em relação ao apresentado nas bibliotecas originais do *framework* [2]. Como resultado, o conteúdo apresentado nesse capítulo fornece todo o embasamento necessário para compreensão da verificação de programas Qt/C++, utilizando o ESBMC++ como ferramenta base e um modelo operacional que utiliza pré e pós-condições para analisar o *framework* em questão.

Capítulo 4

Modelo Operacional para *containers*

Este capítulo descreve o processo de criação do modelo operacional QtOM enfatizando as classes *containers* do *framework* Qt. Inicialmente, na Seção 4.1 é descrito como está disposto as classes *containers* no *framework* Qt, assim como, o seu uso em aplicações. Logo em seguida, na Seção 4.2 é descrito a linguagem que foi utilizada como base para se criar as representações contidas em QtOM com o objetivo de formalizar a implementação de cada *container*. Por fim, nas Seções 4.3 e 4.4 é descrito como as classes *containers* foram divididas entre sequenciais e associativas, e o seu comportam no momento de sua utilização pelo modelo operacional através de lógica formal.

4.1 Introdução

O módulo *Qt Core* possui um subconjunto de classes denominado *Qt Container* [2] como alternativa para os *containers* da *Standard Template Library* (STL) disponíveis na linguagem C++ [45]. Por exemplo, durante o desenvolvimento de uma determinada aplicação, é necessário a criação de uma pilha de tamanho variável para o armazenamento de objetos do tipo *QWidgets*, neste caso, uma alternativa seria o uso da classe *QStack* que implementa um *container* com a política LIFO (do inglês, *last-in, first-out*) (e.g., *QStack<QWidget>*). Além disso, tais *containers* também fazem uso de estruturas denominadas *iterators* no estilo Java/STL, de modo a se deslocar ao longo dos dados armazenados no *container* criado.

Desta forma, esse subconjunto de classes pode ser classificado em dois subgrupos: sequenciais e associativos, dependendo da estrutura de armazenamento implementada. Neste

contexto, as classes *QList*, *QLinkedList*, *QVector*, *QStack* e *QQueue* são classificadas como *containers* sequenciais, enquanto as classes *QMap*, *QMultiMap*, *QHash*, *QMultiHash* e *QSet* são classificadas como *containers* associativos.

4.2 Linguagem Base

Com o intuito de implementar o modelo operacional para as classes que compõe o *Qt Container*, a formalização da linguagem base descrita por Ramalho *et al.* [9] é utilizada e se estende até a formulação das propriedades \mathcal{C} e \mathcal{P} . Contudo, tal linguagem foi adaptada, neste trabalho, com o objetivo de formular adequadamente a verificação de ambos tipos de *containers* (*i.e.*, sequencial ou associativo) como mostrado na figura 4.1.

$$\begin{aligned}
 V &::= v \mid I_v \mid P_v \\
 K &::= k \mid I_k \mid P_k \\
 I &::= i \mid C.begin() \mid C.end() \\
 &\quad \mid C.insert(I, V, \mathbb{N}) \mid C.erase(I) \mid C.search(V) \\
 &\quad \mid C.insert(K, V) \mid C.search(K) \\
 P &::= p \mid P(+ \mid -)P \mid C_k \mid C_v \mid I_k \mid I_v \\
 C &::= c \\
 \mathbb{N} &::= n \mid \mathbb{N}(+ \mid * \mid \dots)\mathbb{N} \mid I_{pos} \mid C_{size}
 \end{aligned}$$

Figura 4.1: Sintaxe da linguagem adaptada, base para a descrição formal dos *conatiners*.

De acordo com a figura 4.1, os elementos básicos estão divididos em dois domínios sintáticos: V para valores e K para as chaves. No entanto, os demais domínios, I , P , \mathbb{N} e C são mantidos por *iterators*, ponteiros, índices inteiros e expressões *container* adequadas, respectivamente. Assim, as variáveis k do tipo K e v do tipo V são adicionadas. Dessa forma, a notação I_v representa um valor armazenado em um *container* em uma posição direcionada pelo *iterator* I e I_k representa uma chave armazenada em um *container* em uma posição direcionada também pelo *iterator* I . Tais notações são abreviações para $store(i, I_{pos}, I_v)$ e $store(i, I_{pos}, I_k)$, respectivamente, onde a expressão $store(t, f, v)$ indica *container* t que no campo f possui um valor v . Da forma similar, P_k e P_v representam ponteiros para a chave e o valor, respectivamente.

Além disso, três outros métodos foram incluídos com o objetivo de descrever as operações realizadas em cada *container*. O método $C.insert(k, v)$ insere um valor v no *container* C com uma chave correspondente k e possui como retorno um *iterator* que aponta para o novo

elemento inserido. O método $C.search(k)$ retorna um *iterator* que aponta para a primeira evidência de um elemento com uma chave k correspondente. De modo semelhante, $C.search(v)$ também retorna um *iterator* que aponta para a primeira evidência de um elemento com um valor v correspondente. No entanto, caso não exista nenhuma chave ou valor correspondente durante a operação com tais métodos, os mesmos retornarão $C.end()$, o qual corresponde ao *iterator* que aponta para a posição imediatamente posterior ao último elemento. Por fim, C_k é um endereço de memória que armazena o início das chaves dos *containers*, assim como, C_v é usado para armazenar os valores dos *containers*.

É importante ressaltar que, todas demais operações provenientes da linguagem base mencionada são utilizadas aqui de acordo como descrito por Ramalho *et al.* [9].

4.3 *Containers* sequenciais

Containers sequenciais tem como objetivo armazenar elementos em uma determinada ordem [46]. De acordo com a documentação do Qt [2], *QList* é a classe *container* mais utilizada e possui uma estrutura em formato de lista encadeada. Da mesma forma, *QLinkedList* também possui um estrutura em forma de lista, embora seja acessada através de *iterators* ao invés de índices inteiros. Na classe *QVector*, há presente uma estrutura de *array* expansível e, por fim, *QStack* e *QQueue* fornecem estruturas que implementam diretivas como LIFO e FIFO (em inglês, *first-in, first-out*), respectivamente.

Para simular adequadamente os *containers* sequenciais, os modelos propostos se utilizam da linguagem base descrita na seção 4.2. Os *containers* sequenciais são implementados a partir de um ponteiro C_v para os valores do *container* e também com um C_{size} , o qual é utilizado para representar o tamanho do respectivo *container* (onde $C_{size} \in \mathbb{N}$). Dessa forma, os *iterators* são modelados por meio de duas variáveis, uma do tipo \mathbb{N} que é denominada de i_{pos} e contém o valor do índice apontado por um *iterator* e outra do tipo P que é chamado por I_v e aponta para um *container* subjacente.

Vale ressaltar que todos os métodos, a partir dessas bibliotecas, podem ser expressos em variações simplificadas de três operações principais, $insertion(C.insert(I, V, \mathbb{N}))$, $deletion(C.erase(I))$ e $search(C.search(V))$. A partir da transformação SSA, os efeitos adversos sobre *iterators* e *containers* são explícitos para que as operações retornem novos *iterators* e *containers*.

Por exemplo, um *container* c com uma chamada $c.search(v)$ representa uma pesquisa pelo elemento v no respectivo *container*. Deste modo, se esse elemento for encontrado, é retornado um *iterator* que aponta para o respectivo elemento, caso contrário, é retornado um *iterator* que aponta para a posição imediatamente posterior ao último elemento do *container* (i.e., $c.end()$). Desta forma, a instrução “ $c.search(v);$ ” torna-se “ $(c', i') = c.search(v);$ ” que possuem efeitos adversos de forma explícita. Assim, a função de tradução \mathcal{C} descreve premissas que estão relacionadas com o “antes” e o “depois” das respectivas versões das variáveis do modelo. Na verdade, notações com apóstrofe (e.g., c' and i') representam o estado das variáveis do modelo, após realizar a execução da respectiva operação; notações simplificadas (e.g., c and i) representam os estados anteriores. Além disso, $select(c, i = lower_{bound} \dots i = upper_{bound})$ representa uma expressão de *loop* (e.g., *for* e *while*), onde cada valor de c , a partir da posição $lower_{bound}$ até $upper_{bound}$, será selecionado. Da mesma forma, $store(c_1, lower_{bound}^1, select(c_2, lower_{bound}^2)) \dots store(c_1, upper_{bound}^1, select(c_2, upper_{bound}^2))$ também representa uma expressão de *loop*, onde cada valor de c_2 , a partir de posição $lower_{bound}^2$ até a posição $upper_{bound}^2$ serão armazenados em c_1 nas posições $lower_{bound}^1$ até $upper_{bound}^1$, respectivamente. Sendo assim,

$$\begin{aligned}
\mathcal{C}((c', i') = c.search(v)) &:= \\
&\wedge i' := c.begin() \\
&\wedge g_0 := select(c_v, i_{pos} = 0 \dots i_{pos} = c_{size} - 1) == v \\
&\wedge i'_{pos} := ite(g_0, i_{pos}, c_{size}) \\
&\wedge i'_v := c'_v.
\end{aligned}$$

Com relação aos *containers* sequenciais, os métodos $C.insert(I, V, \mathbb{N})$ e $C.erase(I)$ se comportam como descrito por Ramalho *et al.* [9].

4.4 Containers Associativos

O grupo dos *containers* associativos possui cinco classes: *QMap*, *QMultimap*, *QHash*, *QMultiHash* e *QSet*. *QMap* tem como abordagem um vetor associativo que conecta cada uma das chaves, de um certo tipo K , a um valor de um certo tipo V , onde as chaves associadas são armazenadas em ordem. Por um lado, *QHash* apresenta um comportamento similar ao *QMap*, contudo os dados armazenados possuem uma ordem arbitrária. *QMultiMap* e *QMultihash* representam respectivamente subclasses de *QMap* e *QHash*, no entanto, ambas classes permitem

o armazenamento de valores replicados. Por fim, *QSet* armazena objetos que estão associados a um conjunto de valores ordenados.

Com o intuito de implementar *containers* associativos, um ponteiro c_v é definido para os valores armazenados, um ponteiro c_k é utilizado para armazenar as chaves do respectivo *container* e uma variável c_{size} é utilizada para guardar a quantidade de elementos inseridos. Em especial, c_k e c_v estão conectados por meio de um índice, ou seja, dado um *container* c que contém uma chave k e um valor v assume-se que

$$[\forall \omega \in \mathbb{N} | 0 \leq \omega < c_{size}]$$

e

$$k \rightarrow v \iff select(c_k, \omega) = k \wedge select(c_v, \omega) = v,$$

onde $(k \rightarrow v)$ indica que uma chave k é associada a um valor v and ω representa uma posição válida em c_k e c_v . Além disso, a função $select(a, i)$ indica o valor de a em um índice i [9]. Novamente, todas as operações dessas bibliotecas podem ser expressadas a partir de uma variação simplificada das três principais operações citadas na Seção 4.3.

Portanto, a operação de inserção para *containers* associativos pode ser realizada de duas maneiras diferentes. Em primeiro lugar, se a ordem não importa, um novo elemento é inserido no final de c_k e c_v . Desta forma, dado um *container* c , o método $c.insert(k, v)$ ao ser chamado realiza inserções de elementos no *container* c com um o valor v e associado a uma chave k , porém se k já existe, ele substitui o valor associado a k por v e retorna um *iterator* que aponta

para o elemento inserido ou modificado. Deste modo,

$$\begin{aligned}
\mathcal{C}((c', i') = c.insert(k, v)) := & \\
& \wedge c'_{size} := c_{size} + 1 \\
& \wedge i' := c.begin() \\
& \wedge g_0 := select(c_k, i_{pos} = 0 \dots i_{pos} = c_{size} - 1) == k \\
& \wedge i'_{pos} := ite(g_0, i_{pos}, c_{size}) \\
& \wedge c'_k := store(c_k, i'_{pos} + 1, select(c_k, i'_{pos})), \\
& \dots, \\
& store(c_k, c_{size}, select(c_k, c_{size} - 1))) \\
& \wedge c'_v := store(c_v, i'_{pos} + 1, select(c_v, i'_{pos})), \\
& \dots, \\
& store(c_v, c_{size}, select(c_v, c_{size} - 1))) \\
& \wedge c'_k := store(c_k, i'_{pos}, k) \\
& \wedge c'_v := store(c_v, i'_{pos}, v) \\
& \wedge i'_k := c'_k \\
& \wedge i'_v := c'_v.
\end{aligned}$$

Em uma outra versão do método de inserção onde a ordem das chaves possuem importância. Todas as variáveis citadas acima são consideradas e uma comparação é realizada, a fim de assegurar que o novo elemento é inserido na ordem desejada. Assim,

$$\begin{aligned}
\mathcal{C}((c', i') = c.insert(k, v)) := & \\
& \wedge c'_{size} := c_{size} + 1 \\
& \wedge i' := c.begin() \\
& \wedge g_0 := select(c_k, i_{pos} = 0 \dots i_{pos} = c_{size} - 1) > k \\
& \wedge g_1 := select(c_k, i_{pos} = 0 \dots i_{pos} = c_{size} - 1) == k \\
& \wedge i'_{pos} := ite(g_0 \vee g_1, i_{pos}, c_{size}) \\
& \wedge c'_k := store(c_k, i'_{pos} + 1, select(c_k, i'_{pos})), \\
& \dots, \\
& store(c_k, c_{size}, select(c_k, c_{size} - 1))) \\
& \wedge c'_v := store(c_v, i'_{pos} + 1, select(c_v, i'_{pos})), \\
& \dots, \\
& store(c_v, c_{size}, select(c_v, c_{size} - 1))) \\
& \wedge c'_k := store(c_k, i'_{pos}, k) \\
& \wedge c'_v := store(c_v, i'_{pos}, v) \\
& \wedge i'_k := c'_k \\
& \wedge i'_v := c'_v.
\end{aligned}$$

Em casos onde chaves com vários valores associados são permitidos, a comparação feita será ignorada, caso seja verificado que já existe um elemento associado a respectiva chave analisada. Por fim, com o propósito de realizar uma exclusão, o método apagar, o qual é representado por *erase(i)* onde *i* é um *iterator* que aponta para o elemento a ser excluído. Isso exclui o elemento apontado por *i*, movendo para trás todos os elementos seguidos pelo elemento que

foi excluído. Deste modo,

$$\begin{aligned}
\mathcal{C}((c', i') = c.erase(i)) := & \\
& \wedge c'_{size} := c_{size} - 1 \\
& \wedge c'_k := store(c_k, i'_{pos}, select(c_k, i'_{pos} + 1)), \\
& \dots, \\
& store(c_k, c_{size} - 2, select(c_k, c_{size} - 1))) \\
& \wedge c'_v := store(c_v, i'_{pos}, select(c_v, i'_{pos} + 1)), \\
& \dots, \\
& store(c_v, c_{size} - 2, select(c_v, c_{size} - 1))) \\
& \wedge i'_k := c'_k \\
& \wedge i'_v := c'_v \\
& \wedge i'_{pos} := i_{pos} + 1.
\end{aligned}$$

Nota-se que tais modelos induzem implicitamente duas propriedades principais que possuem o objetivo de executar de forma correta as operações já mencionadas. A princípio a primeira propriedade se torna evidente quando c_k e c_v são considerados não vazios, isto é, c_{size} também não é nulo para as operações de busca e exclusão de elementos. A segunda propriedade se torna evidente quando i é considerado um *iterator* do respectivo *container* referido, isto é, dado um *container* c com os ponteiros bases c_k e c_v , $i_k = c_k$ e $i_v = c_v$ são mantidos.

4.5 Resumo

Neste capítulo, foi descrito o subconjunto denominado *Qt Container* que está integrado ao módulo *Qt Core* do *framework* multiplataforma Qt, sendo classificado em dois subgrupos: sequenciais e associativos, dependendo da estrutura de armazenamento implementada, logo em seguida, é descrito a linguagem base formalizada por Ramalho *et al.* [9], mas adaptada com o objetivo de formular adequadamente a verificação de ambos tipos de *containers* existentes. Por fim, os *containers* sequenciais e associativos foram descritos de forma detalhada, a fim de ressaltar todos os métodos que constituem essas bibliotecas assim como, a forma que estão implementados a partir de uma transformação SSA realizada. Como resultado, o conteúdo apresentado nesse capítulo fornece todo o embasamento necessário a cerca modelo operacional criado para *Qt Container* usado em QtOM.

Capítulo 5

Avaliação experimental

Este capítulo é dividido em cinco partes. Seção 5.1 descreve toda configuração experimental utilizada, os experimentos e todos os parâmetros de avaliação utilizados. Na Seção 5.2, o desempenho e a eficácia da metodologia proposta são analisados junto a outros solucionadores SMT(Z3, Boolector e Yices 2) utilizando programas sequenciais Qt/C++ baseados em *The Qt Documentation* [50]. Na Seção 5.3 é descrito os resultados obtidos a cerca da verificação de todos os casos de teste presentes na suite de teste *esbmc-qt* utilizando ferramentas de verificação distintas (ESBMC++, LLBMC e DIVINE) com o objetivo de analisar a versatilidade e a eficácia do modelo operacional proposto junto a outras abordagens de verificação. Na Seção 5.4 é descrito os resultados da verificação para as duas aplicações reais (*Locomaps* [16] e *GeoMessage Simulator* [17]) utilizando o modelo operacional proposto denominado QtOM. Por fim, é descrito na Seção 5.5 os resultados da comparação entre os comportamentos do *framework* analisado em relação ao modelo operacional proposto com o intuito de se avaliar o nível de conformidade entre ambos.

5.1 Configuração dos Experimentos

Com o intuito de avaliar a eficácia da abordagem proposta acerca da verificação de programas que utilizam o *framework* Qt, foi criado um conjunto de testes automáticos denominado *esbmc-qt*. Em resumo, este conjunto de testes contém 711 programas Qt/C++ (12903 linhas de código) baseados em *The Qt Documentation* [50], ou seja, todos os casos de teste utilizadas na atual avaliação.

Os casos de teste mencionados acima estão divididos em 10 principais conjuntos de teste, denominados QHash, QLinkedList, QList, QMap, QMultiHash, QMultiMap, QQueue, QSet, QStack e QVector. Vale ressaltar que todos os conjuntos de teste criados possuem casos de teste de acordo com a respectiva classe *container* a ser analisada que em sua maioria possuem acesso aos módulos *Qt Core* e *Qt GUI* (e.g, conjunto de teste QHash possui casos de testes que foram utilizados para avaliar o processo de verificação da classe *container QHash* pertencente ao *framework* multiplataforma Qt). Os casos de teste foram desenvolvidos a partir da documentação [50] referente ao *framework* analisado e também especificamente para analisar todas as características fornecidas pelo *framework*. Além disso, cada caso de teste é verificado manualmente antes de ser adicionado ao seu respectivo conjunto de teste. Desta forma, é capaz de se identificar se um determinado caso de teste possui ou não qualquer erro e está de acordo com a operação a ser realizada. Assim, com base nesta revisão, é possível garantir que 353 dos 711 casos de teste contêm erro (i.e., 49.65% dos casos de teste analisados contêm erro) e 358 casos de teste não possuem falhas (i.e., 50.35% dos casos de teste analisados são considerados corretos). Na realidade esse tipo de revisão é essencial para a avaliação experimental, uma vez que pode-se comparar os resultados obtidos através da verificação realizada pelas ferramentas de verificação utilizadas e avaliar adequadamente se erros reais foram encontrados.

Todos os experimentos foram realizados em um computador Intel Core i7-4790 com 3.60 GHz de clock e 24 GB (22 GB de memória RAM e 2 GB de memória virtual), utilizando-se um sistema operacional *open source* de 64 bits denominado Fedora. Além disso, também se utilizou a ferramenta de verificação ESBMC++ v1.25.4 com três tipos de solucionadores SMT instalados (Z3 v4.0, Boolector v2.0.1 e Yices 2 v4.1). Os limites de tempo e memória utilizados para cada caso de teste foram definidos em 600 segundos e 22 GB, respectivamente. Por fim, uma avaliação foi realizada utilizando o CBMC v5.1, LLBMC v2013.1 e DIVINE v3.3.2 combinados com o modelo operacional proposto (QtOM) com o objetivo de proporcionar comparações entre ferramentas. Os períodos de tempo foram indicados usando a função `clock_gettime` a partir da biblioteca `time.h` [47].

5.2 Comparação entre solucionadores SMT

É conhecido que diferentes solucionadores SMT podem afetar fortemente os resultados obtidos [11], uma vez que não existe homogeneidade em relação a abordagem de implemen-

tação e respectivas heurísticas. Primeiramente, as verificações que foram realizadas, utilizaram os três solucionadores SMT já mencionados (Z3, Boolector e Yices 2) com o objetivo de avaliar o desempenho e a eficácia da metodologia proposta. Desta forma, Yices 2 obteve os piores resultados, apresentando uma taxa de cobertura de 78% e um tempo de verificação de 26,27 minutos. Dessa forma, o Yices 2 não conseguiu resolver corretamente as fórmulas SMT originadas do processo de verificação dos diversos casos de teste. Por outro lado, tanto os solucionadores Z3 quanto Boolector apresentaram uma taxa de cobertura de 89%, apesar do tempo de verificação obtido ao se realizar as verificações utilizando o solucionador Z3 seja inferior as realizadas com o solucionador Boolector, onde, respectivamente, são apresentados tempos de verificação de 223,6 minutos e 26,38 minutos. A partir dos resultados mencionados, o solucionador Boolector mostrou-se 8,5 vezes mais rápido do que o solucionador Z3, apesar da mesma precisão de ambos, mas quatro casos de teste relataram violações a cerca do tempo limite determinado. Além disso, o Yices 2 não conseguiu analisar completamente todos os conjuntos de teste desenvolvidos, pois, não possui suporte a tuplas, logo, apresentou a menor taxa de cobertura e o menor tempo. Em resumo, de acordo com a Figura 5.1, o Boolector se apresenta como o melhor solucionador para o processo de verificação proposto, pois apresenta em menor tempo a maior taxa de cobertura.

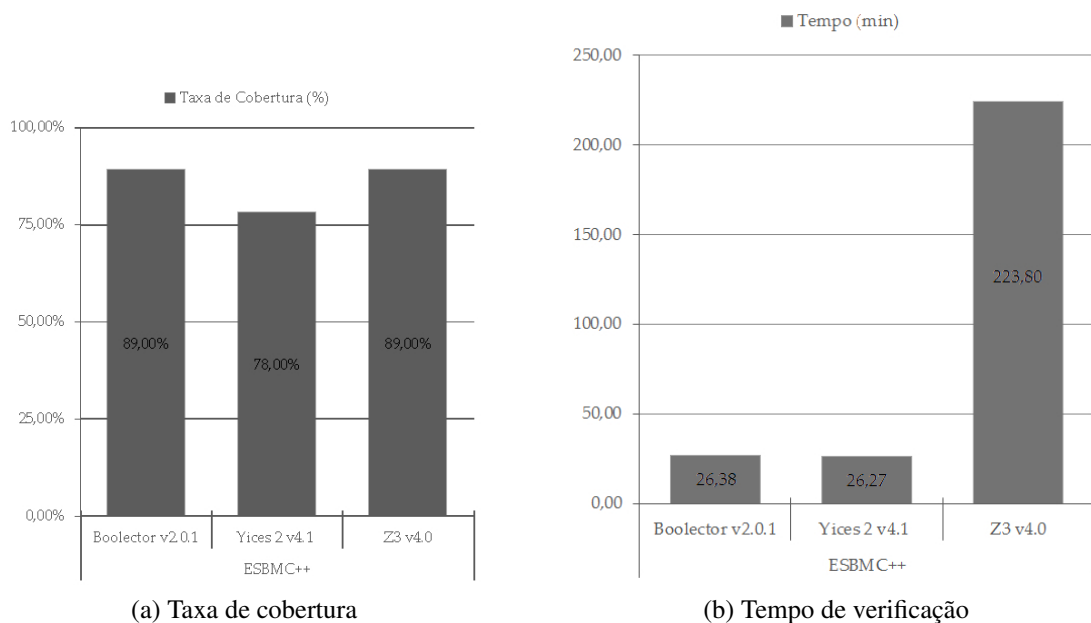


Figura 5.1: Comparação entre solucionadores SMT.

5.3 Verificação dos resultados para o *esbmc-qt*

Todos os casos de teste presentes na suíte de teste *esbmc-qt* foram verificados de forma automática por ESBMC++ com o objetivo de analisar a sua corretude e a eficácia do modelo operacional proposto. Além da comparação entre solucionadores SMT descrita na Seção 5.2, uma outra análise como o objetivo de avaliar a versatilidade e a eficácia do modelo operacional proposto junto a outras abordagens de verificação também foi realizada. Como já mencionado, não existe uma ferramenta de verificação que verifique o *framework* multiplataforma Qt e nem um modelo operacional semelhante ao proposto neste trabalho (QtOM) utilizando a linguagem C++. No entanto, devido à versatilidade do QtOM, também é possível conectá-lo ao processo de verificação de outros verificadores de modelo como LLBMC [27] e DIVINE [14], cuja base deste processo é a tradução do código fonte em uma representação intermediária denominada LLVM. Dessa forma, QtOM é usado como apoio em seus processos de tradução, pois o *bytecode* que logo em seguida é produzido, contém informações a cerca do código fonte utilizado na verificação e do modelo operacional proposto (QtOM). Por fim, foi feita uma comparação em relação ao desempenho do LLBMC e ESBMC++, que são verificadores baseados em técnicas SMT, e DIVINE que emprega uma verificação de modelos através de estados explícitos. Inicialmente, houve uma tentativa de se realizar também uma comparação utilizando o verificador CBMC [21], junto com o modelo operacional proposto (QtOM), mas devido à falhas do verificador em relação à verificação da linguagem C++, não foi possível realizar as verificações previstas, isto já havia sido relatado em trabalhos anteriores por Ramalho *et al.* [9] e Merz *et al.* [27], o que ocasionou em sua remoção durante o processo de avaliação.

As ferramentas utilizadas foram executadas seguindo três roteiros. Um para ESBMC++ que identifica a partir de um arquivo seus parâmetros iniciais e realiza sua execução,¹ outro para LLBMC que usando CLang² [23] compila o código fonte desejado criando seu *bytecode* e logo em seguida, também a partir de um arquivo identifica seus parâmetros iniciais e realiza a sua execução³ e outro para DIVINE que também pré-compila os códigos fontes em C++ criando seus respectivos *bytecode*⁴ para que em seguida realize sua verificação sobre eles.⁵ O

¹`esbmc *.cpp --unwind <bound> --no-unwinding-assertions -I /home/libraries/ - -memlimit 14000000 - -timeout 600`

²`/usr/bin/clang++ -c -g -emit-llvm *.cpp -fno-exceptions`

³`llbmc *.cpp --ignore-missing-function-bodies --max-loop-iterations=<bound> --no-max-loop-iterations-checks`

⁴`divine compile -llvm -o main.bc *.cpp`

⁵`divine verify main.bc --max-time=600 --max-memory=14000 -d`

desdobramento de laços é definido para cada ferramenta, isto é, o valor de *<bound>* varia entre os casos de teste. Por enquanto, o LLBMC não suporta tratamento de exceção e os *bytecodes* que foram criados estavam com a opção *-fno-exceptions* ativa em seu compilador. Vale ressaltar, que se esta opção estiver ativa, o LLBMC sempre abortará durante seu processo de verificação.

A Tabela 5.1 mostra os resultados experimentais para as junções entre QtOM e LLBMC, DIVINE e ESBMC++ usando Boolector como seu principal solucionador SMT. *TC* representa o número de programas Qt/C++, *L* representa a quantidade total de linhas de código, *Time* representa o tempo total da verificação, *P* representa o número de casos de teste sem defeitos (*i.e.*, resultados positivos corretos), *N* representa o número de casos de teste com defeitos (*i.e.*, resultados negativos corretos), *FP* representa o número falsos positivos obtidos (*i.e.*, a ferramenta relata programas que estão corretos como incorretos), *FN* representa o número de falsos negativos obtidos (*i.e.*, a ferramenta relata programas incorretos como corretos) e *Fail* representa o número de erros internos obtidos durante a verificação (*e.g.*, erros de análise). Vale ressaltar que o ESBMC++ utilizando Boolector não apresenta estouro de memória e tempo em qualquer caso de teste utilizado.

Suíte de teste	TC	L	ESBMC++ v1.25.4						LLBMC v2013.1						DIVINE v3.3.2					
			Time	P	N	FP	FN	Fail	Time	P	N	FP	FN	Fail	Time	P	N	FP	FN	Fail
QHash	74	1170	117.2	33	33	4	4	0	37.13	31	37	0	6	0	1432.5	32	33	0	1	8
QLinkedList	87	1700	77.0	40	39	2	2	4	23.3	18	41	2	26	0	1907.6	30	42	1	14	0
QList	124	2317	102.1	53	55	7	9	0	19.4	28	56	0	28	12	2599.7	52	56	0	4	12
QMap	99	1989	277.2	42	39	10	8	0	406.4	41	46	2	8	2	2109.9	40	44	0	5	10
QMultiHash	24	363	186.4	12	12	0	0	0	30.8	12	12	0	0	0	466.3	13	12	0	0	0
QMultiMap	26	504	136.9	13	13	0	0	0	32.0	13	13	0	0	0	549.9	14	13	0	0	0
QQueue	16	299	191	8	8	0	0	0	3.9	8	8	0	0	0	339.7	8	8	0	0	0
QSet	94	1702	500.5	43	43	4	4	0	132.6	40	44	1	5	4	1897.2	40	41	0	0	13
QStack	12	280	14.5	5	5	0	0	2	2.2	6	5	1	0	0	262.1	6	6	0	0	0
QVector	152	2582	157.3	67	68	7	8	2	1825.7	44	73	0	29	6	3057.5	68	72	0	6	6
Total	708	12903	1760	316	315	34	35	8	2513.5	241	335	6	102	24	14722.4	303	327	1	30	49

Tabela 5.1: Resultados obtidos da comparação entre ESBMC++ v1.25.4 (usando Boolector como solucionador SMT), LLBMC v2013.1 e DIVINE v3.3.2.

De acordo com a Tabela 5.1, apenas 1,1% dos casos de teste com o ESBMC++ alegaram falhas durante sua verificação, isto ocorre quando a ferramenta não é capaz de realizar a verificação de um determinado programa devido à erros internos encontrados. DIVINE e LLBMC apresentam taxas de falha de 6,9% e 3,4%, respectivamente, por conta de tais ferramentas não conseguirem criar os *bytecodes* dos programas utilizados ou durante a verificação

realizada foi relatado que houve um estouro de memória ou de tempo. Em relação aos resultados *FP*, DIVINE obteve o melhor desempenho seguido por LLBMC e ESBMC++. Contudo, ESBMC++ obteve a taxa mais baixa em relação aos resultados de falsos negativos (*FN*) seguido por DIVINE e por fim LLBMC, isso ocorre devido à forma que os *iterators* estão implementados no modelo operacional proposto (QtOM), por meio de ponteiros e vetores com o objetivo de simular seus comportamentos de forma real e de acordo com o visto no Capítulo 4. No entanto, a estrutura criada não cobre todos os comportamentos descritos na documentação do *framework*. Em particular, quando uma remoção de um elemento é realizada em um *container* em que existe mais de um *iterator* apontando para ele, todos os *iterators* que apontam para o elemento que foi removido serão perdidos. Desta forma, este comportamento afetará as pós-condições de um programa que influenciam diretamente nos resultados obtidos em relação a *FP* e *FN*. Vale ressaltar que vetores e ponteiros têm sido extensivamente utilizados, de modo a obter estruturas simples, isto é, sem classes e *structs* em sua representação o que diminui a complexidade do processo de verificação (ver Seção 3.3). Por fim, os resultados da combinação entre ESBMC++ e QtOM em um verificador robusto, ainda possui algumas lacunas a serem preenchidas a respeito do suporte a linguagem C++ como descrito por Ramalho *et al.* [9].

Vale mencionar que o nível de complexidade ao se verificar o código fonte de um programa aumenta de acordo com a quantidade de estruturas (dados, repetição, seleção, etc.) que possuir. No entanto, de acordo como mostrado na Figura 5.2, os conjuntos de teste *QMap* e *QSet* apresentam os maiores tempos durante o processo de verificação ao se utilizar o ESBMC++, apesar de *QVector* ser o mais extenso conjunto de casos de teste existente. Isso acontece por ser analisado a quantidade de laços presente no programa e não somente o número de linhas de código que ele possui, o que afeta diretamente os tempos de verificação. Na realidade, as estruturas internas associadas ao modelo operacional das classes *QMap* e *QSet* contêm mais laços do que as demais, desta forma, obtém-se tempos de verificação mais longos. Como também visto na Figura 5.2, o LLBMC apresenta um maior tempo de verificação ao se utilizar o conjunto de teste *QVector*, na qual, isto ocorre devido a 2 casos de teste em que houve estouro do tempo estimado para que seja realizada a verificação. Além disso, o DIVINE é a ferramenta que apresenta o menor desempenho entre as citadas, pois, seu processo de criação do *bytecode* é mais custoso do que a realização da verificação sobre o mesmo. Dessa forma, os conjuntos de teste com mais programas a serem analisados obtiveram os maiores tempos que no caso são *QVector*, *QList*, *QMap*, *QLinkedList* e *QSet*.

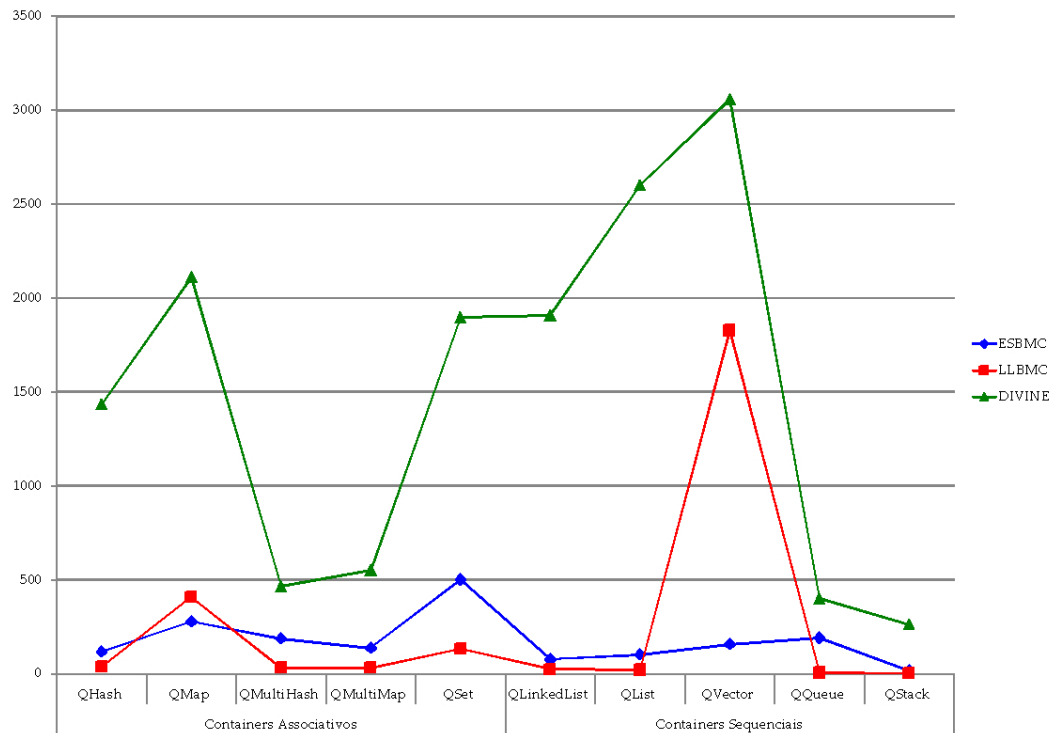


Figura 5.2: Comparação entre os tempos de verificação em relação a ESBMC++, LLBMC e DIVINE.

A Figura 5.3 mostra que todos os verificadores obtiveram uma taxa de cobertura acima de 80% para os *containers* do tipo associativo. Contudo, o LLBMC não se manteve com a mesma taxa ao analisar os *containers* do tipo sequencial. Vale ressaltar que todos os casos de teste a partir dos conjuntos de teste QMultiMap e QMultiHash foram verificados corretamente por todos os verificadores utilizados. Os conjuntos de teste QHash, QMap e QSet, por sua vez, apresentaram uma taxa média de 6,7% para resultados falsos positivos e falsos negativos, ou seja, de 3 a 18 casos de teste dos 267 casos de teste são considerados falsos positivos ou falsos negativos, isso ocorre devido às limitações na representação interna dos *iterators*. Além disso, o LLBMC e DIVINE, respectivamente, não conseguiram verificar cerca de 4,5% e 13,9% dos casos de teste dos *containers* associativos, ou seja, 12 e 13 dos 267 casos de teste não conseguiram ser verificados devido às falhas no processo de criação do *bytecode*. Em relação aos *containers* do tipo sequencial, LLBMC apresentou baixas taxas de cobertura para os conjuntos de teste QVector, QLinkedList e QList, taxas a cerca de 67,7% a 77%, ou seja, 84/117 dos 124/152 casos de teste, respectivamente. Além disso, cerca de 22,9% dos casos de teste (83 dos 363 analisados) apresentaram resultados falsos negativos devido também à problemas com a representação interna dos *iterators*. Vale ressaltar, que cerca de 5% dos casos de teste (18 dos

363 analisados) não haviam sido verificados por LLBMC, uma vez que não foi capaz de criar os *bytecodes* desejados. O ESBMC++ e DIVINE, por sua vez, apresentaram uma taxa de erro de no máximo de 6,6%, ou seja, 24 dos 363 casos de teste para os conjuntos de teste QVector, QLinkedList e QList apresentam erros de análise em suas pós-condições. Além disso, todos os casos de teste dos conjuntos de teste QQueue e QStack foram verificados corretamente, com exceção de dois casos presentes em QStack, pois, ao se utilizar o Boolector com a ferramenta ESBMC++, não foi possível obter uma solução para as fórmulas SMT criadas para os casos analisados.

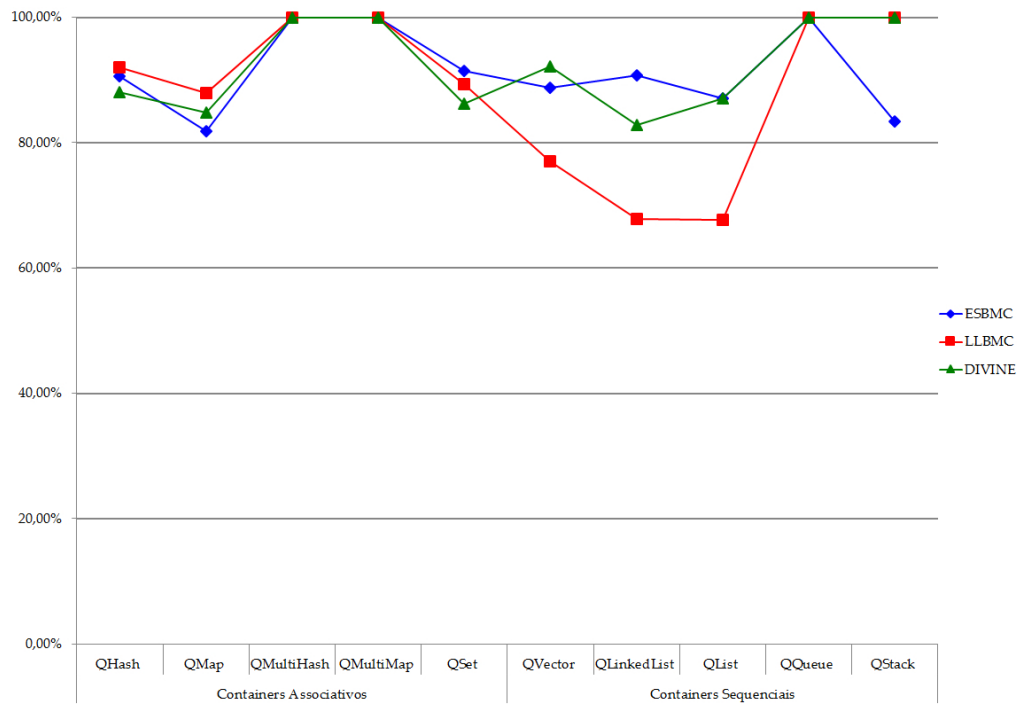


Figura 5.3: Comparação entre a taxa de cobertura em relação a ESBMC++, LLBMC e DIVINE.

Os conjuntos de teste QList, QMap, QVector e QSet possuem mais resultados falsos positivos e negativos em seus testes ao se utilizar o ESBMC++ do que as outras ferramentas. A taxa de cobertura a cerca dos casos de teste verificados corretamente se encontra em torno de 80% a 90%, respectivamente, o que demonstra a eficácia em relação a verificação realizada uma vez que cada caso de teste verifica características diferentes dos *containers* sequenciais e associativos.

Vale ressaltar que o ESBMC++ foi capaz de identificar cerca de 89,3% dos erros nos casos de teste utilizados (*i.e.*, 631 dos 708 casos de testes utilizados possuem erros), o que demonstra também a eficácia da metodologia proposta. Similarmente, LLBMC e DIVINE

apresentam, respectivamente, taxas com 81,4% e 89% (i.e., 576 e 630 dos 708 casos de teste utilizados possuem erros), o que também demonstra uma boa adequação do modelo operacional proposto (QtOM) combinado com outras ferramentas de verificação. Como consequência, a metodologia proposta não apenas se limita a uma determinada ferramenta, podendo-se adaptar para aplicações específicas em que algumas abordagens sejam mais adequadas do que outras.

5.4 Verificação dos resultados para aplicações reais

Dado que o conjunto de casos de teste proposto possui como objetivo verificar propriedades específicas dos módulos pertencentes ao *framework* multiplataforma Qt, também é necessário incluir resultados de verificações que envolvam aplicações reais. Os parágrafos seguintes descrevem as respectivas aplicações e seus resultados associados.

A aplicação chamada *Locomaps* [16] é um exemplo de programa que utiliza o *framework* multiplataforma Qt e exibe imagens de satélite, terrenos, mapas de ruas, serviço de planejamento de mapas em mosaicos e possui uma integração com GPS *Qt Geo*. Utilizando o mesmo código fonte esta aplicação pode ser compilada e executada nos principais sistemas operacionais existentes (Mac OS X, Linux e Windows). Esta aplicação possui duas classes com 115 linhas de código no total, utilizando Qt/C++ e usando cinco APIs diferentes do *framework* Qt (*QApplication*, *QCoreApplication*, *QDesktopWidget*, *QtDeclarative* e *QMainWindow*). Vale mencionar que o código escrito em Qt/C++ desta aplicação, as APIs e as bibliotecas utilizadas são considerados no processo de verificação, assim como, as propriedades relacionadas a eles.

ArcGIS [48] para as forças armadas é uma plataforma geográfica que é utilizado para criar, organizar e compartilhar materiais geográficos com usuários que utilizam mapas inteligentes *online*. A partir disso, *GeoMessage Simulator* [17] possui como entrada de dados arquivos XML e cria em diferentes frequências datagramas utilizando o protocolo de datagramas por usuário (*em inglês*, User Datagram Protocol - UDP) para aplicações ArcGIS e componentes do sistema. *GeoMessage Simulator* também é uma aplicação multi-plataforma que contém 1209 linhas de códigos em Qt/C++ que utiliza 20 diferentes APIs do *framework* multi-plataforma Qt englobando várias características, tais como o sistema de eventos de Qt, *strings*, manipulação de arquivos e *widgets*. Vale ressaltar que *GeoMessage Simulator* usa duas classes, *QMutex* e *QMutexLocker*, relacionadas ao módulo *Qt Threading* que possui classes para programas concorrentes. Tais classes foram utilizadas na aplicação para travar ou destravar mutexes

e, o mais importante, ESBMC++ é capaz de verificar adequadamente esses tipos de estruturas. No entanto, o modelo operacional proposto (QtOM) ainda não fornece um suporte completo para o módulo *Qt Threading*.

O ESBMC++ junto ao modelo operacional proposto (QtOM) foi aplicado para verificar as aplicações *Locomaps* e *GeoMessage Simulator* buscando verificar as seguintes propriedades: violação dos limites de um array, estouros aritméticos, divisão por zero, segurança de ponteiro e outras propriedades específicas do *framework* definidas em QtOM de acordo com o Capítulo 3. Além disso, o ESBMC++ foi capaz de identificar completamente o código-fonte de cada aplicação, utilizando cinco diferentes módulos de QtOM para *Locomaps* e vinte módulos para *GeoMessage Simulator*, ou seja, cada módulo de QtOM usado correspondia a uma API utilizada pela aplicação que seria verificada. O processo de verificação de ambas as aplicações foi totalmente automático e a metodologia proposta levou aproximadamente 6,7 segundos para gerar 32 VCs para *Locomaps* e 16 segundos para gerar 6421 VCs para *GeoMessage Simulator* em um comum *desktop*. Além disso, o ESBMC++ não relata caso haja qualquer falso negativo, mas foi capaz de encontrar bugs semelhantes em ambas as aplicações, as quais foram confirmadas pelos desenvolvedores e são explicadas abaixo.

```
1 int main(int argc, char *argv[]) {  
2     QApplication app(argc, argv);  
3     return app.exec();  
4 }
```

Figura 5.4: Fragmento de código do arquivo principal da aplicação *Locomaps*.

A Figura 5.4 mostra um fragmento de código retirado do principal arquivo da aplicação *Locomaps* que utiliza a classe *QApplication* que está presente no módulo *QtWidgets*. Nesse caso em particular, se o parâmetro *argv* não for corretamente inicializado, logo o construtor ao ser chamado pelo objeto *app* não é executado de forma correta acarretando em falhas na aplicação (veja a linha 2, na Figura 5.4). A fim de verificar esta propriedade, o ESBMC++ analisa 2 assertivas em relação aos parâmetros de entrada da aplicação (veja as linhas 4 e 5, na Figura 5.5), avaliando-as como pré-condições. Um erro semelhante também foi encontrado na aplicação *GeoMessage Simulator* e uma maneira possível para corrigir tal erro é sempre verificar, com instruções condicionais, se *argv* e *argc* são argumentos válidos antes de utilizá-las em uma operação.

```
1 class QApplication {
2     ...
3     QApplication( int & argc , char ** argv ){
4         __ESBMC_assert( argc > 0, ‘‘Invalid
          parameter ’’);
5         __ESBMC_assert( argv != NULL, ‘‘Invalid
          pointer ’’);
6         this->str = argv;
7         this->_size = strlen(*argv);
8         ...
9     }
10    ...
11 };
```

Figura 5.5: Modelo operacional para o construtor de *QApplication*().

5.5 Verificação da conformidade de QtOM

Todos os processos, funções, APIs, ferramentas e especificações necessárias para o desenvolvimento de aplicações que utilizam o *framework* multiplataforma Qt são descritas por *The Qt Developers* em [49]. Na verificação de modelos, as aplicações analisadas se utilizam de funções disponibilizadas pelo ambiente de verificação criado com o objetivo de garantir a exatidão da verificação, ou seja, se obter uma análise de forma correta. Para que isso ocorra, o comportamento do sistema desenvolvido (modelo operacional) deve ser o mesmo do sistema real (framework) analisado.

Inicialmente, foi realizado uma análise sobre todos os casos de testes utilizados em *esbmc-qt* com intuito de verificar a imparcialidade e a confiabilidade das aplicações utilizadas. Todos os casos de teste analisados foram desenvolvidos utilizando a linguagem C++ junto com as funções disponibilizadas pelo *framework* Qt, onde cada implementação usa as estruturas de dados e funções presente em Qt *containers* em todas as condições possíveis de acordo com *The Qt Documentation* [50]. Cada caso de teste proporciona uma falha e um sucesso de acordo com a estrutura ou função empregada. Logo em seguida, todos os casos de testes presentes em *esbmc-qt* foram compilados e executados utilizando o ambiente de desenvolvimento do Qt denominado QtCreator. QtCreator é um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) multiplataforma utilizado por desenvolvedores para criar diversas aplicações que utilizam o

framework Qt para desktops, sistemas embarcados e plataformas de dispositivos móveis. É um ambiente de desenvolvimento disponível para Linux, OS X e Windows [51]. Dessa forma, se obteve um comportamento base de Qt *containers* que seria comparado ao comportamento do modelo operacional proposto (QtOM) com o objetivo de verificar o nível de semelhança entre ambos, visto que não há outra ferramenta ou modelo operacional desenvolvido até o momento. Por fim, os mesmo casos de teste compilados e executados por QtCreator foram compilados e executados por Clang com o modelo operacional proposto (QtOM) intregado a ele com o intuito de se determinar o seu comportamento.

A Figura 5.6 mostra o resultado da comparação descrita anteriormente, assim como, em testes anteriores os conjuntos de testes estão divididos em *containers* associativos compostos por QHash, QSet, QMap, QMultiHash e QMultiMap e *containers* sequenciais compostos por QList, QQueue, QLinkedList, QStack e QVector. Vale ressaltar que QtCreator por ser o ambiente de desenvolvimento padrão para criação de aplicações que usam o *framework* Qt, obteve um nível de conformidade de 100% em todos os conjuntos de testes que compõe *esbmc-qt* em todas as condições possíveis de acordo com *The Qt Documentation* [50]. Entretanto, ao se analisar o comportamento do compilador Clang junto com o modelo operacional proposto (QtOM), se obtém um nível de conformidade com média de 97,827% em todos os conjuntos de testes que compõe *esbmc-qt* em todas as condições possíveis de acordo com *The Qt Documentation* [50].

Ao se analisar de modo particular, os conjuntos de testes QMultiHash, QMultiMap, QQueue, QStack obtiveram um nível de 100% de semelhança comparado aos resultados obtidos por QtCreator. O conjunto de teste QMap obteve o menor nível de semelhança de 91,919% em relação a QtCreator, isso ocorreu devido algumas representações presente no modelo operacional possuírem erros no uso de seus iterators o que impossibilitava o acesso de determinados dados nas estruturas representadas e nas representações que utilizam funções estáticas, na qual, havia a perda do dado utilizado na estrutura representada, QMap é considerado o conjunto de teste com o maior número de falsos positivos e negativos entres os conjuntos de teste existentes correspondendo a cerca de 8,080% dos seus casos de teste. Os conjuntos de testes QHash, QLinkedList e QList, respectivamente, obtiveram níveis de semelhança de 94,667%, 98,850%, 97,580%, isso ocorreu devido a problemas com a representação de iterators usadas no modelo operacional, assim como, em QMap ao se utilizar mais de um iterator no caso de teste, a referência sobre os demais iterators utilizados é perdida no momento em que se usa um iterator para acessar/modificar dados presente no *container* analisado. O conjunto de teste QLinkedList é o

conjunto de teste que obteve o maior nível de semelhança entre os conjuntos de teste que não obtiveram um nível de conformidade de 100%. O conjunto de teste QSet obteve um nível de semelhança de 97,872% em relação a QtCreator, isso ocorreu devido algumas representações possuírem problemas em suas funções estáticas havendo perda de dados nas estruturas representadas. Por fim, o conjunto de caso QVector considerado o maior conjunto em numero de casos de teste obteve um nível de semelhança de 97,378%, pois, não foi possível realizar a representação de funções onde em suas definições tinham como objetivo realizar algum tipo de manipulação da memória como "Ajuste fino" "Melhoria no gerenciamento da memória" e entre outras definições. Vale ressaltar que não é possível criar esses tipos de representação, pois não se sabe como o *framework* analisado trata essas funções internamente o que impossibilita criar uma representação na linguagem base utilizada. O conjunto QVector também teve problemas relacionados a utilização de mais um iterator, assim como, os conjuntos QMap, QHash, QLinkedList e QList.

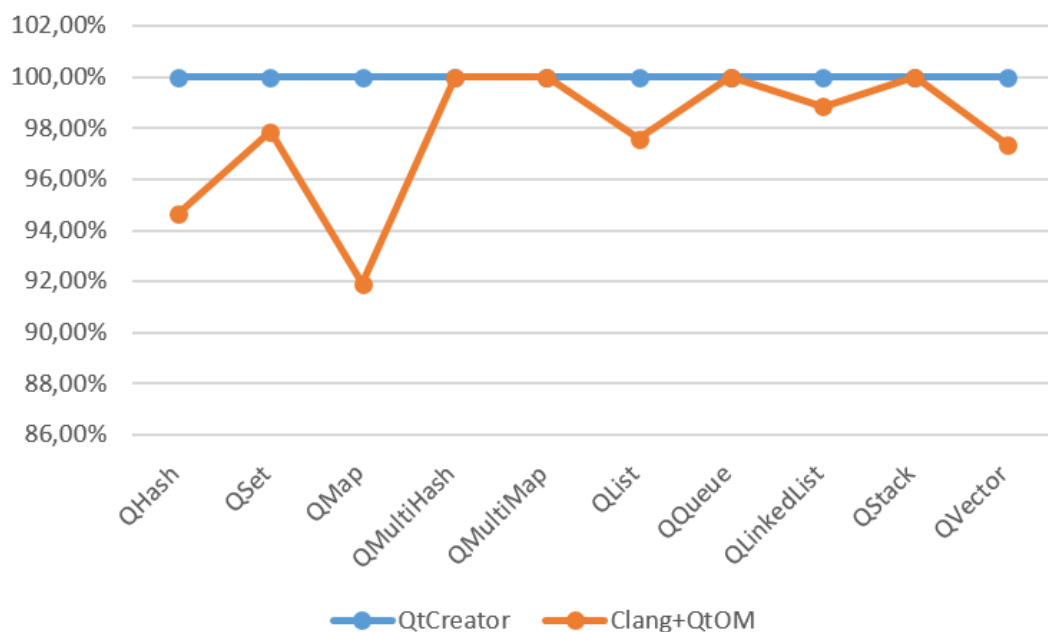


Figura 5.6: Comparação entre o comportamento de QtCreator e Clang+QtOM para medir a conformidade de QtOM.

5.6 Resumo

De acordo com o embasamento teórico realizado pelos capítulos anteriores em relação as técnicas SMT utilizadas, o processo de verificação de ESBMC++ e o modelo operacional

para *Qt Container* desenvolvido. Neste capítulo, inicialmente foi descrito como foi construída a configuração dos experimentos realizados, com o intuito de avaliar a eficácia da metodologia proposta a cerca da verificação de programas que utilizam o *framework* multiplataforma Qt, a partir de uma suíte de testes denominado *esbmc-qt* que contém todos os casos de teste utilizadas na atual avaliação. O *esbmc-qt* contém 711 programas Qt/C++ que de acordo com os experimentos realizados é possível garantir que 353 dos 711 casos de teste contêm erro (*i.e.*, 49.65% dos casos de teste analisados contêm erro) e 358 casos de teste não possuem falhas (*i.e.*, 50.35% dos casos de teste analisados são considerados corretos).

Em seguida, foi descrito como foi realizado e avaliado a comparação entre os solucionadores SMT utilizados (Z3, Boolector e Yices 2) junto com o ESBMC++ utilizando programas Qt/C++ sequenciais. Isso foi realizado, pois, solucionadores SMT podem afetar fortemente os resultados obtidos, uma vez que não existe homogeneidade em relação a abordagem de implementação e respectivas heurísticas. Sendo assim, Yices 2 obteve os piores resultados, apresentando uma taxa de cobertura de 78% e um tempo de verificação de 26,27 minutos mas tanto Z3 quanto Boolector apresentaram uma taxa de cobertura de 89% com tempos de verificação de 223,6 minutos e 26,38 minutos, respectivamente. Por fim, Boolector mostrou-se 8,5 vezes mais rápido do que o solucionador Z3, apesar da mesma precisão de ambos.

Também foram descritos os resultados obtidos a cerca da verificação de todos os casos de teste presentes na suíte de teste *esbmc-qt* utilizando ferramentas de verificação distintas (ESBMC++, LLBMC e DIVINE) com o objetivo de analisar a versatilidade e a eficácia do modelo operacional proposto junto a outras abordagens de verificação. Cada processo de verificação e as limitações das ferramentas são descritos. Vale ressaltar que o ESBMC++ foi capaz de identificar cerca de 89,3% dos erros nos casos de teste utilizados (*i.e.*, 631 dos 708 casos de testes utilizados possuem erros), LLBMC e DIVINE apresentam, respectivamente, taxas com 81,4% e 89% (*i.e.*, 576 e 630 dos 708 casos de teste utilizados possuem erros). Como consequência, a metodologia proposta não apenas se limita a uma determinada ferramenta, podendo-se adaptar para aplicações específicas em que algumas abordagens sejam mais adequadas do que outras.

Também foi descrito os resultados obtidos através da verificação de duas aplicações reais *Locomaps* e *GeoMessage Simulator* utilizando QtOM. O ESBMC++ junto ao modelo operacional proposto (QtOM) foi aplicado para verificar as aplicações *Locomaps* e *GeoMessage Simulator* buscando verificar as seguintes propriedades: violação dos limites de um array, es-

touros aritméticos, divisão por zero, segurança de ponteiro e outras propriedades específicas do *framework* definidas em QtOM. O processo de verificação de ambas as aplicações com a metodologia proposta levou aproximadamente 6,7 segundos para gerar 32 VCs para *Locomaps* e 16 segundos para gerar 6421 VCs para *GeoMessage Simulator* em um comum *desktop* onde ambas aplicações possuíam o mesmo erro.

Por fim, é descrito os resultados obtidos através da comparação entre o comportamento real do *framework* multiplataforma Qt e o modelo operacional desenvolvido (QtOM) com o objetivo de avaliar o nível de conformidade entre ambos. Primeiramente, houve uma análise sobre todos os casos de testes de *esbmc-qt* com o intuito de verificar a imparcialidade e confiabilidade das aplicações. Para se obter o comportamento real do *framework* Qt se utilizou um ambiente de desenvolvimento padrão denominado QtCreator. Todos os casos de testes presente em *esbmc-qt* foram compilados e executados com QtCreator que por ser um ambiente de desenvolvimento padrão do *framework* analisado obteve um nível de conformidade de 100% sobre todos os casos de testes submetido. Logo em seguida, os mesmos casos de testes utilizados em QtCreator foram compilados e executados utilizando Clang+QtOM, dessa forma, se obteve o comportamento do modelo operacional desenvolvido com uma média de 97,827% de nível de conformidade. Vale ressaltar que todo caso de teste presente em *esbmc-qt* abordam todas as condições possíveis de acordo com *The Qt Documentation*. De modo particular, os conjuntos de teste QMap, QSet, QHash, QMultiHash, QMultiMap, QList, QQueue, QLinkedList, QStack, QVector obtiveram níveis de conformidade de 94,667%, 97,872%, 91,919%, 100,000%, 100,000%, 97,580%, 100,000%, 98,850%, 100,000%, 97,378%, respectivamente. Cada conjunto de teste possui suas peculiaridades, sendo QMap o conjunto de teste que obteve o menor nível de conformidade devido a problemas em suas representações e QLinkedList sendo o conjunto que obteve o maior nível de conformidade entre os conjuntos que não obtiveram um nível igual a 100%.

Capítulo 6

Conclusões

A abordagem proposta neste trabalho tem como objetivo verificar programas que utilizam o *framework* multiplataforma Qt desenvolvido em Qt/C++, usando um modelo operacional denominado de QtOM que se utiliza de pré e pós-condições, simulação de características (por exemplo, como os elementos que possuem valores são manipulados e armazenados) e também da forma como são utilizados em dispositivos de eletrônica de consumo. A forma como o modelo operacional proposto foi implementado, foi também descrita, levando-se em consideração que é usado para verificar *containers* de tipos sequenciais e associativos. Além disso, uma aplicação *touchscreen* baseada em Qt que utiliza mapas de navegação, imagens de satélite e dados de terrenos [16] e outra que gera *datagramas broadcast* UDP com base em arquivos XML [17] foram verificadas usando o ESBMC++ com o QtOM. Desta forma, foi mostrado o potencial da abordagem proposta para a verificação de aplicações reais baseadas no *framework* Qt.

Este trabalho possui como contribuição principal a construção de um modelo operacional denominado QtOM que oferece suporte à *containers* sequenciais e associativos que utilizam o *framework* multiplataforma Qt. Os experimentos que foram realizados envolvem programas em Qt/C++ com características oferecidas pelas classes *container* do *framework* multiplataforma Qt e abordam todas as condições possíveis de acordo com *The Qt Documentation* [50].

Além disso, também foram avaliados o desempenho dos solucionadores Z3, Boolector e Yices 2, dado que eles foram utilizados no processo de verificação dos programas que utilizam o *framework* multiplataforma Qt com ESBMC++ e o modelo operacional proposto (QtOM).

Como resultado, o Boolector apresentou a maior taxa de cobertura dos programas verificados com um menor tempo de verificação e o ESBMC++ apresentou uma taxa de sucesso de 89,3% para o conjunto de teste utilizado com um tempo de 1760 segundos de verificação. Ainda foi avaliado o nível de conformidade do modelo operacional proposto (QtOM) através da comparação de entre o comportamento real do *framework* e o comportamento do modelo operacional desenvolvido. Como resultado, QtOM obteve um nível de conformidade com média de 97,827% e de maneira particular os conjuntos de teste QHash, QSet, QMap, QMultiHash, QMultiMap, QList, QQueue, QLinkedList, QStack, QVector obtiveram níveis de conformidade de 94,667%, 97,872%, 91,919%, 100,000%, 100,000%, 97,580%, 100,000%, 98,850%, 100,000%, 97,378%, respectivamente. O conjunto de teste QMap obteve o menor nível de conformidade devido a problemas em suas representações e QLinkedList foi o conjunto de teste que obteve o maior nível de conformidade entre os conjuntos que não obtiveram um nível igual a 100%.

Por fim, outra fundamental contribuição é a integração de QtOM dentro do processo de verificação de outro dois diferentes verificadores de modelo conhecidos como LLBMC e DIVINE, demonstrando a versatilidade do QtOM. Esse tipo de alternativa também demonstra resultados importantes, uma vez que LLBMC detectou 95% dos erros existentes com um tempo de verificação de 2513 segundos e o DIVINE encontrou 92% dos erros existentes com um tempo de verificação em torno de 1760 segundos. Contudo, o LLBMC possui a maior taxa de resultados incorretos entre as ferramentas utilizadas com 18,6%, seguido de DIVINE com 11,3% e por fim ESBMC++ com 10,9%. Vale ressaltar que o DIVINE é 7 vezes mais lento do que as demais ferramentas utilizadas, seguido pelo LLBMC e ESBMC++, respectivamente. Em resumo, o QtOM pode ser integrado em uma ferramenta de verificação adequada e utilizado para verificar programas reais que estão escritos em C++/Qt para cenários específicos e aplicações.

6.1 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros, o modelo operacional proposto (QtOM) será estendido com o objetivo de oferecer suporte à verificação de programas multi-tarefas que utilizam o *framework* multiplataforma Qt. Além disso, mais classes e bibliotecas serão adicionadas com o intuito de aumentar a cobertura da verificação em relação ao *framework* multiplataforma Qt e dessa forma validar suas respectivas propriedades. Por fim ferramentas para medição de desempenho

do modelo operacional proposto e testes de conformidade serão incluídos, a fim de verificar se rotinas específicas estão de acordo com as limitações de tempo. Por fim, será investigada a verificação por indução matemática no ESBMC^{QrOM} para provar a corretude de programas Qt [52, 53].

Referências Bibliográficas

- [1] CORDEIRO, L.; FISCHER, B.; CHEN, H.; MARQUES-SILVA, J. Semiformal verification of embedded software in medical devices considering stringent hardware constraints. In: *Proceedings of the 2009 International Conference on Embedded Software and Systems*. 2009. (ICESS '09), p. 396–403. ISBN 978-0-7695-3678-1.
- [2] The Qt Company Ltd. *The Qt Framework*. 2015. <http://www.qt.io/qt-framework/>. [Online; accessed 2-April-2015].
- [3] BERARD, B.; BIDOIT, M.; FINKEL, A.; LAROUSSINIE, F.; PETIT, A.; PETRUCCI, L.; SCHNOEBELEN, P. *Systems and Software Verification: Model-Checking Techniques and Tools*. : Springer Publishing Company, Incorporated, 2010. ISBN 3642074782, 9783642074783.
- [4] CLARKE JR., E. M.; GRUMBERG, O.; PELED, D. A. *Model Checking*. : MIT Press, 1999. ISBN 0-262-03270-8.
- [5] BAIER, C.; KATOEN, J. *Principles of model checking*. : MIT Press, 2008. ISBN 978-0-262-02649-9.
- [6] MEHLITZ, P.; RUNGTA, N.; VISSER, W. A hands-on java pathfinder tutorial. In: *Proceedings of the 2013 International Conference on Software Engineering*. 2013. p. 1493–1495. ISBN 978-1-4673-3076-3.
- [7] MERWE, H. van der; MERWE, B. van der; VISSER, W. Execution and property specifications for jpf-android. *ACM SIGSOFT Software Engineering Notes*, 2014.
- [8] MERWE, H. van der; TKACHUK, O.; MERWE, B. van der; VISSER, W. Generation of library models for verification of android applications. *ACM SIGSOFT Software Engineering Notes*, 2015.

- [9] RAMALHO, M.; FREITAS, M.; SOUSA, F.; MARQUES, H.; CORDEIRO, L.; FISCHER, B. Smt-based bounded model checking of c++ programs. In: *Proceedings of the 20th Annual IEEE International Conference and Workshops on the Engineering of Computer Based Systems*. 2013. p. 147–156.
- [10] CORDEIRO, L. C.; FISCHER, B. Verifying multi-threaded software using smt-based context-bounded model checking. In: *Proceedings of the 33rd International Conference on Software Engineering, ICSE 2011, Waikiki, Honolulu , HI, USA, May 21-28, 2011*. 2011. p. 331–340.
- [11] CORDEIRO, L.; FISCHER, B.; MARQUES-SILVA, J. SMT-based bounded model checking for embedded ANSI-C software. *IEEE Trans. Software Eng.*, 2012.
- [12] MONTEIRO, F. R.; CORDEIRO, L. C.; FILHO, E. B. de L. Bounded Model Checking of C++ Programs Based on the Qt Framework. In: *4th Global Conference on Consumer Electronics*. : IEEE, 2015.
- [13] PEREIRA, P. A.; ALBUQUERQUE, H. F.; MARQUES, H. M.; SILVA, I. S.; CARVALHO, C. B.; CORDEIRO, L. C. Verifying cuda programs using smt-based context-bounded model checking. ACM, 2016.
- [14] BARNAT, J.; BRIM, L.; HAVEL, V.; HAVLÍČEK, J.; KRIHO, J.; LENČO, M.; ROČKAI, P.; ŠTILL, V.; WEISER, J. DiVinE 3.0 – An Explicit-State Model Checker for Multithreaded C & C++ Programs. In: *Computer Aided Verification (CAV 2013)*. 2013. p. 863–868.
- [15] FALKE, S.; MERZ, F.; SINZ, C. The bounded model checker LLBMC. In: *ASE*. 2013. p. 706–709.
- [16] Locomaps. *Spatial Minds and CyberData Corporation*. 2012. <https://github.com/craig-miller/locomaps>. [Online; accessed 10-September-2015].
- [17] Environmental Systems Research Institute. *GeoMessage Simulator*. 2015. <https://github.com/Esri/geomessage-simulator-qt>. [Online; accessed 15-September-2015].
- [18] MOURA, L. M. de; BJØRNER, N. Z3: an efficient SMT solver. In: *TACAS*. 2008. p. 337–340.

- [19] DUTERTRE, B. Yices 2.2. In: *Computer-Aided Verification (CAV'2014)*. 2014. p. 737–744.
- [20] BRUMMAYER, R.; BIERE, A. Boolector: An efficient SMT solver for bit-vectors and arrays. In: *TACAS*. 2009. p. 174–177.
- [21] KROENING, D.; TAUTSCHNIG, M. CBMC - C bounded model checker - (competition contribution). In: *TACAS*. 2014. p. 389–391.
- [22] WANG, W.; BARRETT, C.; WIES, T. Cascade 2.0. In: *VMCAI*. 2014. p. 142–160.
- [23] LATTNER, C. *CLang Documentation*. 2015. [Online; accessed December-2015].
- [24] BLANC, N.; GROCE, A.; KROENING, D. Verifying C++ with STL containers via predicate abstraction. In: *ASE*. 2007. p. 521–524.
- [25] Wintersteiger, C. *goto-cc – a C/C++ front-end for Verification*. 2009. <http://www.cprover.org/goto-cc/>. [Online; accessed January-2016].
- [26] SITES, R. L. *Some Thoughts on Proving Clean Termination of Programs*. 1974.
- [27] MERZ, F.; FALKE, S.; SINZ, C. LLBMC: bounded model checking of C and C++ programs using a compiler IR. In: *VSTTE*. 2012. p. 146–161.
- [28] MORSE, J.; CORDEIRO, L.; NICOLE, D.; FISCHER, B. Model checking ltl properties over ansi-c programs with bounded traces. 2013.
- [29] MORSE, J.; RAMALHO, M.; CORDEIRO, L.; NICOLE, D.; FISCHER, B. ESBMC 1.22. In: *Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems*. : Springer Berlin Heidelberg, 2014. p. 405–407.
- [30] MORSE, J.; CORDEIRO, L.; NICOLE, D.; FISCHER, B. Handling unbounded loops with esbmc 1.20. In: *Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems*. : Springer Berlin Heidelberg, 2013. p. 619–622.
- [31] CORDEIRO, L.; MORSE, J.; NICOLE, D.; FISCHER, B. Context-bounded model checking with esbmc 1.17. In: *Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems*. : Springer Berlin Heidelberg, 2012. p. 534–537.

- [32] ROCHA, H.; BARRETO, R. S.; CORDEIRO, L. C.; NETO, A. D. Understanding programming bugs in ANSI-C software using bounded model checking counter-examples. In: *IFM*. 2012. p. 128–142.
- [33] BRADLEY, A. R.; MANNA, Z. *The Calculus of Computation: Decision Procedures with Applications to Verification*. : Springer-Verlag New York, Inc., 2007. ISBN 3540741127.
- [34] MCCARTHY, J. Towards a mathematical science of computation. In: *In IFIP Congress*. 1962. p. 21–28.
- [35] BARRETT, C.; TINELLI, C. CVC3. In: *CAV*. 2007. p. 298–302.
- [36] MOURA, L. M. de; BJØRNER, N. Satisfiability modulo theories: An appetizer. In: *SBMF*. 2009. p. 23–36.
- [37] Qt Jambi. *Qt Jambi*. 2015. <http://qtjambi.org>. [Online; accessed December-2015].
- [38] Qt in Home Media. 2011. <http://qt.nokia.com/qt-in-use/qt-in-home-media>. [Online; accessed July-2011].
- [39] Qt in IP Communications. 2011. <http://qt.nokia.com/qt-in-use/qt-in-ip-communications>. [Online; accessed July-2011].
- [40] Panasonic selects Qt for HD video system. 2011. <http://qt.nokia.com/about/news/panasonic-selects-qt-for-hd-video-system>. [Online; accessed July-2011].
- [41] RESEARCH2GUIDANCE. *Cross-Platform Tool Benchmarking*. 2014.
- [42] The Qt Company Ltd. *Signals and Slots - QtCore 5*. 2015. <https://doc.qt.io/qt-5/signalsandslots.html>. [Online; accessed 2-April-2015].
- [43] The Qt Company Ltd. *The Meta-Object System*. 2015. <http://doc.qt.io/qt-5/metaobjects.html>. [Online; accessed 2-April-2015].
- [44] MUSUVATHI, M.; PARK, D. Y. W.; CHOU, A.; ENGLER, D. R.; DILL, D. L. Cmc: A pragmatic approach to model checking real code. *ACM*, 2002.
- [45] ISO/IEC. *ISO/IEC 14882:2003: Programming languages: C++*. : International Organization for Standardization, 2003.

- [46] DEITEL, P.; DEITEL, H. *C++ How to Program.* : Prentice Hall, 2013. ISBN 978-85-7605-056-8.
- [47] The Open Group. *The Single UNIX ®Specification, Version 2 – time.h.* 1997. <http://pubs.opengroup.org/onlinepubs/007908775/xsh/time.h.html>. [Online; accessed December-2015].
- [48] Environmental Systems Research Institute, Inc. *ArcGIS for the Military.* 2015. <http://solutions.arcgis.com/military/>. [Online; accessed 25-November-2015].
- [49] Qt Developers. *Qt Developers.* 2015. <https://www.qt.io/developers/>. [Online; accessed July-2016].
- [50] Qt Documentation. *Qt Documentation.* 2015. <http://doc.qt.io/>. [Online; accessed December-2015].
- [51] Qt Creator. *Qt Creator.* 2015. <http://doc.qt.io/qtcreator/index.html>. [Online; accessed July-2016].
- [52] GADELHA, M. Y. R.; ISMAIL, H. I.; CORDEIRO, L. C. Handling loops in bounded model checking of c programs via k-induction. *International Journal on Software Tools for Technology Transfer*, p. 1–18, 2015. ISSN 1433-2787.
- [53] ROCHA, H.; ISMAIL, H.; CORDEIRO, L. C.; BARRETO, R. S. Model checking embedded C software using k-induction and invariants. *V Brazilian Symposium on Computing Systems Engineering (SBESC)*, p. 90–95, 2015.

Apêndice A

Publicações

- **Garcia, M. A. P.**, Sousa, F. R. M., Cordeiro, L. C., Lima Filho, E. B. ESBMCQtOM: A Bounded Model Checking Tool to Verify Qt Applications. Software Testing, Verification and Reliability (submetido), John Wiley Sons Ltd, 2016.
- **Garcia, M. A. P.**, Sousa, F. R. M., Cordeiro, L. C., Lima Filho, E. B. ESBMCQtOM: A Bounded Model Checking Tool to Verify Qt Applications. In 23rd International SPIN symposium on Model Checking of Software (SPIN), LNCS 9641, pp. 97-103, 2016.