



INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL NA AVALIAÇÃO DE CÓDIGOS EM UM
SISTEMA COMPLEXO DE DETECÇÃO COM DESENVOLVIMENTO
COLABORATIVO

Andressa A. Sivolella Gomes

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-graduação em Engenharia
Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do
Rio de Janeiro, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do título de Mestre em
Engenharia Elétrica.

Orientador: José Manoel de Seixas

Rio de Janeiro
Março de 2016

INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL NA AVALIAÇÃO DE CÓDIGOS EM UM
SISTEMA COMPLEXO DE DETECÇÃO COM DESENVOLVIMENTO
COLABORATIVO

Andressa A. Sivolella Gomes

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE
ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. José Manoel de Seixas, D.Sc.

Prof. Aluízio Fausto Ribeiro Araújo, D.Sc.

Prof. Afonso de Bediaga e Hickman, D.Sc.

Prof. Luis Henrique Maciel Kosmalski Costa, D.Sc.

Pesquisadora Carmen Lúcia Lodi Maidantchik, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
MARÇO DE 2016

Sivolella Gomes, Andressa A.

Inteligência Computacional na Avaliação de Códigos em um Sistema Complexo de Detecção com Desenvolvimento Colaborativo /Andressa A. Sivolella Gomes. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

XII, 41 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: José Manoel de Seixas

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 36 – 41.

1. Mineração de códigos. 2. Métodos ensemble com árvores. 3. Plataforma colaborativa. I. Manoel de Seixas, José. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

A todo mundo, geralzão.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL NA AVALIAÇÃO DE CÓDIGOS EM UM
SISTEMA COMPLEXO DE DETECÇÃO COM DESENVOLVIMENTO
COLABORATIVO

Andressa A. Sivolella Gomes

Março/2016

Orientador: José Manoel de Seixas

Programa: Engenharia Elétrica

Apresenta-se, nesta tese, ...

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

COMPUTATIONAL INTELLIGENCE FOR SOURCE CODE ASSERTION IN A
COMPLEX SYSTEM WITH A COLLABORATIVE DEVELOPMENT
ENVIRONMENT

Andressa A. Sivolella Gomes

March/2016

Advisor: José Manoel de Seixas

Department: Electrical Engineering

In this work, we present ...

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xii
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	1
1.3 Organização do documento	1
2 A Física de Altas Energias	2
2.1 CERN e LHC	2
2.2 Experimento ATLAS	4
2.3 Calorímetro Hadronico de Telhas (TileCal)	5
2.3.1 Análise <i>Online</i> e <i>Offline</i>	6
2.3.2 A colaboração TileCal	7
3 Plataforma web Tile-in-ONE	8
3.1 Fluxo de dados	9
3.2 Infraestrutura	11
3.3 Novo desenvolvimento	11
4 Mineração de códigos fonte para identificação de falhas	13
4.1 Analisadores estáticos e Mineração de códigos no CERN	15
4.2 Escolha de atributos	16
4.2.1 Analisadores Estáticos	16
4.2.2 Medidas estatísticas e de qualidade	17
4.3 Métodos <i>ensemble</i> em Árvores de Decisão	19
4.3.1 Bagged Trees (<i>Bootstrap Aggregating</i>)	20
4.3.2 Random Forest	21
4.3.3 Boosted Decision Trees (BDT)	21

5	Métodos utilizados e Discussão de resultados	23
5.1	Aquisição de códigos fonte	23
5.2	Análise de atributos	26
5.3	Avaliação dos Classificadores	27
6	Conclusões	35
	Referências Bibliográficas	36

Listas de Figuras

2.1	Representação aérea do LHC e seus detectores no CERN. Extraído de [1].	3
2.2	Esquema do detector ATLAS. Adaptado de [2]	4
2.3	Calorímetro de Telhas do ATLAS (com suas 4 partições na cor verde) envolvendo o calorímetro de argônio líquido. O Sistema Magnético e a Câmara de Múons não estão ilustrados nesta figura. Adaptado de [3].	5
2.4	Estrutura de absorção e amostragem do TileCal. Extraído de [4]	6
2.5	Esboço das células do TileCal. Extraído de [3].	6
3.1	<i>Dashboard Web System</i> , desenvolvido em 2010 para integrar as os dados adquiridos e as análises do grupo de QD do TileCal. Mais detalhes em [5]	9
3.2	Esquemático representando a infraestrutura da plataforma Tile-in-ONE. Em vermelho, a nova camada a ser desenvolvida.	11
3.3	Fluxo de dados da plataforma web Tile-in-ONE.	12
4.1	Estimativa do percentual de erros inseridos durante fases do SDLC. (Fonte: <i>Computer Finance Magazine</i> . Dados extraídos de [6])	14
4.2	<i>Bagged Trees</i> pseudo-código. Retirado de [7].	21
4.3	Ilustração do método BDT. Baseado em [8].	22
5.1	Total de códigos fonte escritos (512) entre Junho/2014 e Dezembro/2015.	24
5.2	Retornos obtidos após tentativa de executar códigos fonte em máquinas <i>slave</i>	25
5.3	Percentuais de alvos do conjunto de códigos fonte.	25
5.4	Matriz de correlação dos 11 atributos extraídos inicialmente	26
5.5	Matriz de correlação dos 6 atributos selecionados. As correlações com a saída também são calculadas.	27
5.6	Pseudo-código do algoritmo <i>AdaBoost</i>	30
5.9	Atributos mais relevantes de acordo com erro OOB	31
5.7	Matrizes de Confusão dos 4 classificadores gerados.	32

5.8	Medidas de desempenho dos 4 classificadores gerados.	33
-----	--	----

Lista de Tabelas

4.1	Lista inicial de atributos	19
5.1	Lista de atributos selecionados	27
5.2	Resumo das medidas de desempenho dos 4 classificadores gerados . .	34

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

1.2 Objetivos

1.3 Organização do documento

Capítulo 2

A Física de Altas Energias

A Física de Partículas estuda os constituintes da matéria e as interações entre elas. Esse estudo também é referenciado como Física de Altas Energias, devido à grande quantidade de energia necessária para a observação das estruturas básicas da matéria.

Este capítulo aborda o ambiente da física de partículas no CERN, bem como o colisor de partículas atualmente em operação, o LHC, com destaque para o experimento ATLAS e um de seus calorímetros (TileCal).

2.1 CERN e LHC

Fundado em 1954, o CERN (em francês *Centre Européen pour la Recherche Nucléaire* [9]) é o maior centro de pesquisa na área de física de partículas de altas energias no mundo. Atualmente, conta com a participação de 38 países membros e outros países colaboradores, entre eles o Brasil.

O LHC (em inglês *Large Hadron Collider* [10]) é o maior colisor de partículas já construído e encontra-se atualmente em operação no CERN. Instalado a 175 metros abaixo do solo, consiste em um grande túnel em formato anelar, com 27 km de perímetro. Quando partículas são eletricamente carregadas e submetidas a pulsos eletromagnéticos no interior de tubos tem-se o processo de aceleração de partículas. Neste processo, as partículas adquirem aceleração ao serem envolvidas a campos eletromagnéticos variantes [11]. Em aceleradores circulares, partículas são injetadas e circulam no anel até atingirem a energia desejada. Diversos experimentos podem ser realizados em determinados pontos de colisão ao longo da circunferência. O perímetro do acelerador circular é diretamente proporcional a energia necessária na colisão. Ao atingir a energia desejada, os feixes de partículas aceleradas em sentidos opostos colidem e, nesse caso, detectores em formato cilíndrico são os mais utilizados. Cada colisão gera informações que devem ser analisadas por especialistas, com objetivos distintos, tais como: identificação de sub-partículas, observação de fenômenos

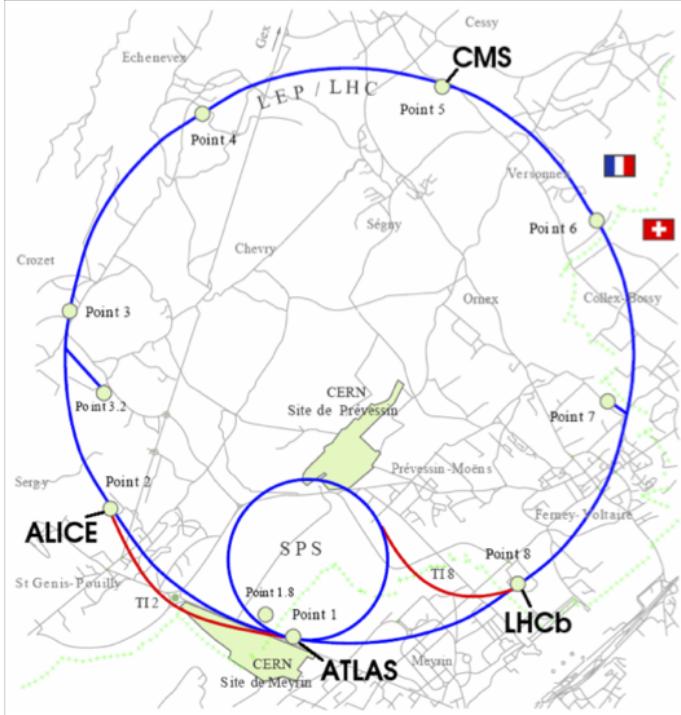


Figura 2.1: Representação aérea do LHC e seus detectores no CERN. Extraído de [1].

e a comprovação ou a eliminação de teorias físicas. Nos pontos de colisão, detectores são montados para observação e coleta de dados. Existem, por exemplo, detectores de calorimetria, para identificar a energia depositada pelas partículas colisionadas; detectores de traços, para observar trajetórias após colisões; e detectores de mísseis, responsáveis por absorver tais partículas.

Um dos objetivos do LHC (e também do ATLAS) é a comprovação da existência de uma nova partícula, o bóson de Higgs. Essa partícula, prevista no modelo padrão foi recentemente comprovada experimentalmente através do experimento em questão, laureando Peter Higgs e François Englert com o prêmio Nobel da Física na sua última edição, ocorrida em 2013 [12]. Segundo o modelo, o mecanismo de Higgs é o que dá massa a todas as partículas elementares, e o bóson de Higgs é uma partícula escalar maciça, que valida o modelo padrão. Sua detecção é difícil, uma vez que é necessária uma energia muito grande para sua observação. Ainda assim, por ser uma partícula muito energética, sua detecção se dá através de seus decaimentos, chamados de assinaturas do bóson de Higgs.

A figura 2.1 ilustra uma representação aérea do LHC. Existem quatro detectores de partículas instalados em pontos de colisão ao longo da extensão do LHC, altamente especializados: ALICE [13], ATLAS [3], CMS [14] e LHCb [15]. Os detectores ilustrados permitem obter informações detalhadas sobre a trajetória das partículas resultantes das colisões ocorridas e características energéticas, sendo possível iden-

tificar partículas. O ATLAS é o maior dos detectores do LHC.

2.2 Experimento ATLAS

O ATLAS (em inglês *A Toroidal LHC ApparatuS*) [3] é um detector em formato cilíndrico. O detector pesa aproximadamente 7.000 toneladas, com 44 metros de comprimento por 24 metros de altura. A figura 2.2 ilustra os diversos subsistemas que compõem o detector ATLAS.

Cada subsistema apresenta uma característica específica de acordo com suas funcionalidades. São eles, da parte interna para a externa:

- Detector Interno (ID), responsável por registrar as trajetórias das partículas resultantes da colisão, bem como o momento e o sinal da carga, se for o caso;
- Sistema de Calorimetria, composto pelos calorímetros eletromagnético (LAr) e hadrônico de telhas (TileCal). Os calorímetros citados são responsáveis por medirem a energia das partículas resultantes;
- Sistema Magnético, responsável por desviar partículas carregadas para medir o momento;
- o Espectrômetro de Múons, responsável por medir a trajetória de uma determinada partícula denominada Múon.

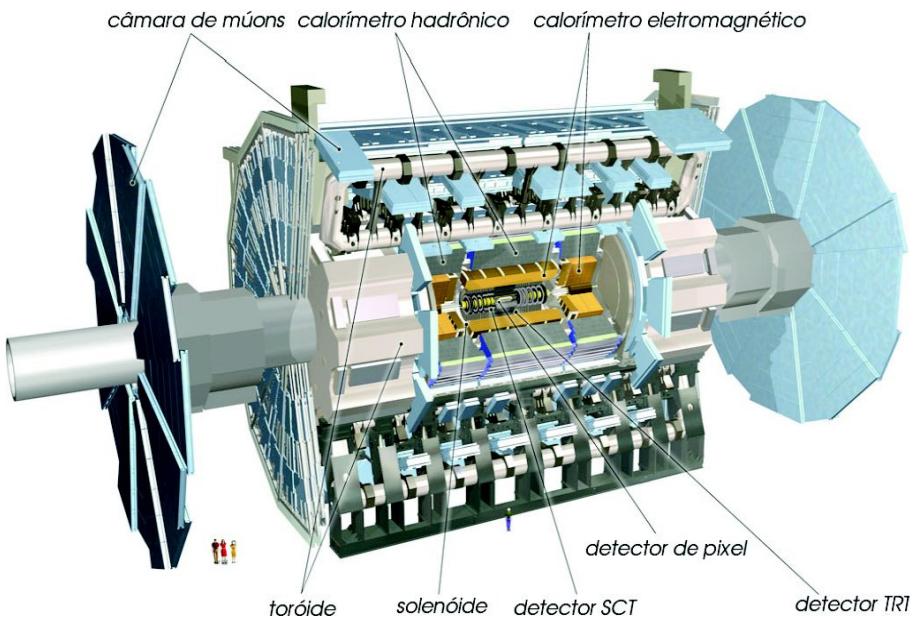


Figura 2.2: Esquema do detector ATLAS. Adaptado de [2]

O sistema de calorimetria do LHC foi projetado para absorver a energia das partículas que cruzam o detector, sendo o calorímetro hadrônico de telhas (em inglês *Tile Calorimeter* ou TileCal) é o foco deste mestrado.

2.3 Calorímetro Hadrônico de Telhas (TileCal)

O TileCal [4] é composto por três barris: um central (que se divide em duas partições: LBA e LBC) e dois estendidos (cada um correspondendo a mais duas partições, EBA e EBC, respectivamente), como ilustrado na figura 2.3. Cada partição é igualmente dividida em 64 partes (módulos). Os módulos do TileCal são compostos de ferro como mediadores passivos e telhas cintilantes como material ativo. A estrutura absorvedora é coberta de placas de aço de várias dimensões, conectadas a uma estrutura maciça de suporte. A principal inovação deste detector é a posição perpendicular das telhas em relação aos feixes do LHC.

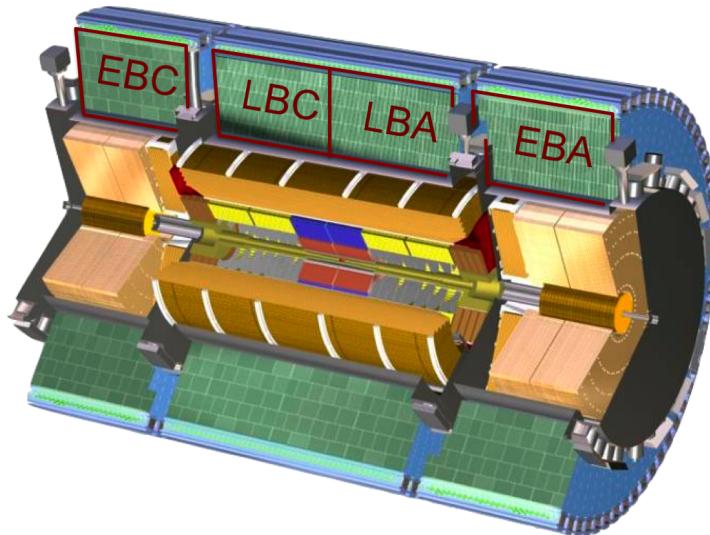


Figura 2.3: Calorímetro de Telhas do ATLAS (com suas 4 partições na cor verde) envolvendo o calorímetro de argônio líquido. O Sistema Magnético e a Câmara de Múons não estão ilustrados nesta figura. Adaptado de [3].

A passagem de partículas ionizadas pelo TileCal produz luz no espectro. Sua intensidade é proporcional à energia depositada pela partícula. A luz produzida se propaga através das telhas para suas bordas onde é absorvida por fibras óticas e deslocada, por reflexão interna total, até os canais de leitura eletrônica ou fotomultiplicadores (em inglês *PhotoMultipliers Tubes* ou PMTs), onde é convertido em um sinal de corrente. Um PMT pode ser idealizado como um pulso de corrente. A figura 2.4 ilustra a estrutura de absorção e amostragem do TileCal sendo possível identificar tubos fotomultiplicadores.

Os módulos do barril central do detector comportam 45 canais cada, enquanto os módulos dos barris estendidos comportam 32 canais. Radialmente, cada módulo do TileCal ainda é segmentado em três camadas (A, BC e D), conhecidas como células. Estas são formadas pelo agrupamento de fibras até cada PMT. Um esboço

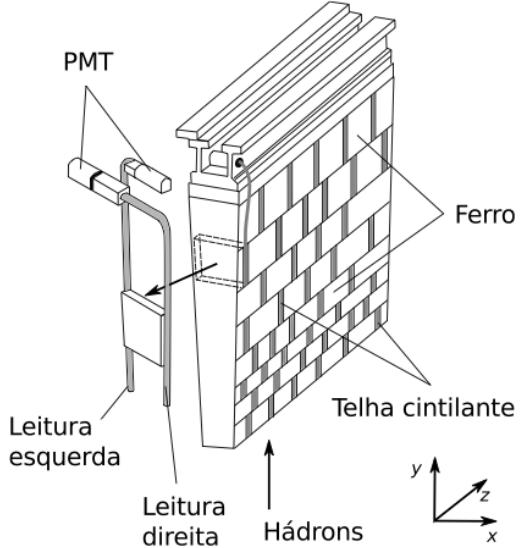


Figura 2.4: Estrutura de absorção e amostragem do TileCal. Extraído de [4]

da geometria das células é apresentado na figura 2.5. Cada módulo contém 11 linhas transversas de telhas.

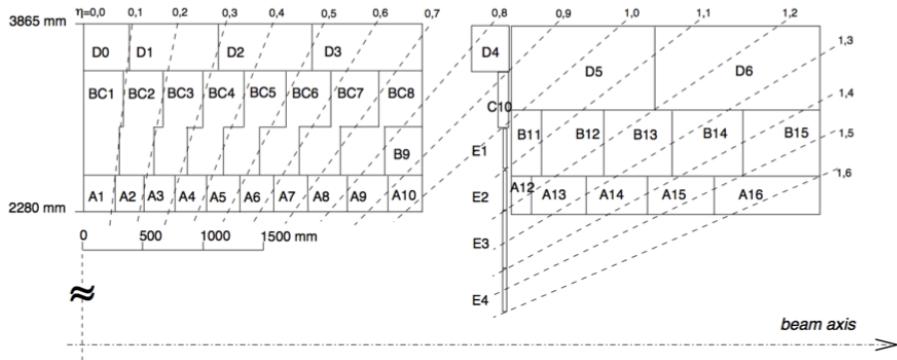


Figura 2.5: Esboço das células do TileCal. Extraído de [3].

2.3.1 Análise *Online* e *Offline*

Existem dois tipos de análises, comuns a todos os experimentos do LHC. O experimento ATLAS, sozinho, gera um volume de dados na ordem de 3,2 PetaBytes ao ano [16], que precisam ser processados e analisados. Nesse caso, é impraticável armazenar os dados adquiridos pelo experimento em sua totalidade para posterior análise. Por esse motivo, análises referentes a atividades anteriores ao armazenamento em mídia permanente são definidas como *online*. Já as análises que ocorrem a partir do acesso de informações em bases de dados são definidas como sendo *offline*.

As soluções abordadas neste mestrado estão contextualizadas no processo de análise *offline* do TileCal.

As análises *online* e *offline* serão descritas detalhadamente na seção 3.

2.3.2 A colaboração TileCal

O TileCal é composto ainda por diferentes grupos, responsáveis por atividades específicas no experimento. Cada grupo desempenha uma etapa no processo de trabalho do calorímetro. São eles:

DAQ (do inglês, *Data Acquisition* ou **aquisição de dados**) responsável pela aquisição dos sinais resultantes das interações físicas no detector;

DCS (do inglês, *Detector Control System*, ou **sistema de controle do detector**) responsável pela manutenção das fontes de alta e baixa tensão do TileCal, placas mãe e sistema de refrigeração;

DQ (do inglês, *Data Quality*, ou **qualidade de dados**) responsável por avaliar o funcionamento do detector garantindo confiabilidade nos dados adquiridos que serão analisados;

Calibração (do inglês, *Calibration*) responsável pela calibração das células do calorímetro e validação da escala eletromagnética, a fim de corrigir desvios que ocorrem ao longo do tempo devido a desgastes ocorridos pela exposição do detector a altos níveis de radiação;

Computação e Software responsável por realizar a organização e desenvolvimento da simulação, reconstrução, digitalização e desenvolvimento de filtros de alto nível;

Dados e Processamento (do inglês, *Data and Processing*) responsável por coletar informações dos grupos de qualidade de dados e calibração a fim de decidir que alterações nos dados de condições serão realizadas. Responsável também por analisar os dados físicos.

Existem, portanto, seis grupos no TileCal onde o compartilhamento de informações entre eles faz-se necessário: se um PMT não está sendo corretamente alimentado, a qualidade dos dados adquiridos pode ficar comprometida. Tal situação exige o compartilhamento de informações do grupo e DQ, por exemplo.

Capítulo 3

Plataforma web Tile-in-ONE

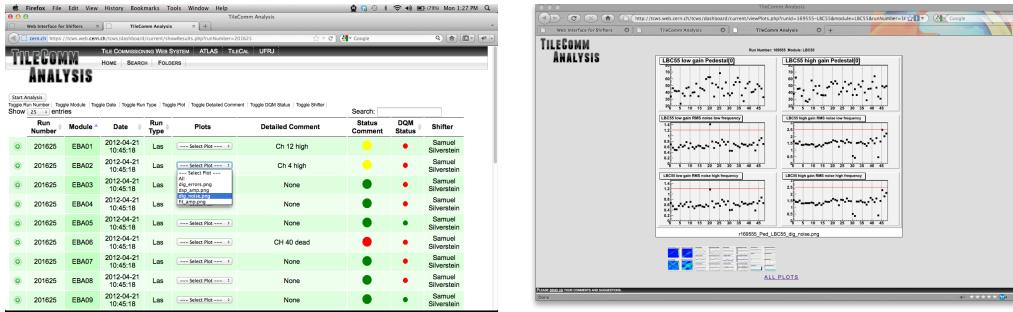
Diversos sistemas foram desenvolvidos ao longo das diferentes fases do experimento, cada um com um propósito específico [5]. A análise *online* tem início com a aquisição e decisão acerca do armazenamento dos dados adquiridos, que é responsabilidade do grupo TDAQ (do inglês, *Trigger and Data Acquisition*) [17]. A reconstrução dos dados pelo software para análise *offline* ATHENA [18] marca o início da análise *offline*. Em seguida, o DQMF (do inglês, *Data Quality Monitoring System*) [19] é aplicado e gera automaticamente estados para os PMTs, indicando a qualidade do tubo fotomultiplicador e reduzindo a quantidade de canais que precisam ser analisados. Nesta etapa, gráficos são gerados para auxiliar o grupo de qualidade de dados do TileCal em sua análise *offline*. Um sistema web foi desenvolvido para integrar os resultados gráficos gerados durante a etapa de reconstrução, guiando o grupo de qualidade de dados em suas análises. A figura 3.1 ilustra sistemas integrados por uma única interface web: a figura 3.1(a) corresponde a lista de dados reconstruídos e quais gráficos já estão disponíveis para a colaboração, indicando que a atuação do ATHENA foi concluída; a figura 3.1(b) exibe informação detalhada sobre um determinado módulo, acessado pela interface ilustrada anteriormente. Através deste sistema web é possível inserir comentários relacionados a performance do detector; e a figura 3.1(c) ilustra alguns gráficos gerados durante a etapa de reconstrução dos dados.

Para uma referência histórica, a lista de canais definidos como defeituosos pela colaboração (*Bad Channels List*) é armazenada no banco de dados de condicionamento, comum a todos os experimentos que compõem o LHC, o COOL DB [20]. Os sistemas MCWS (do inglês, *Monitoring & Calibration Web System*) [21] e DCS (do inglês, *Detector Control System*) [22] apoiam o grupo de qualidade de dados na análise dos quase 10.000 PMTs do calorímetro de telhas. O MCWS foi desenvolvido para exibir a lista de canais defeituosos de maneira gráfica e permite que comentários sobre o estado do detector sejam compartilhados. O sistema web DCS foi desenvolvido para monitorar as fontes de alta tensão que alimentam os PMTs.

The screenshot shows a Firefox browser window with the title "Web Interface for Shifters". The URL is https://rcws.web.cern.ch/rcws/dashboard/current/showRunList.php. The page has a header with "WIS" logo and navigation links for "HOME" and "TIMELINE". Below the header is a table titled "Overview" with columns: Run Number, Run Type, Date, # of Events, OK, Some Problems, Bad, Not to be Analyzed, Not Analyzed, # of Modules, Plots, and Shifter. The table lists several runs from 2012-04-21, including RampCIS, Ped, and CIS runs, with various status codes and module counts.

Run Number	Run Type	Date	# of Events	OK	Some Problems	Bad	Not to be Analyzed	Not Analyzed	# of Modules	Plots	Shifter
201650	RampCIS	2012-04-21 12:01:49	85461	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	120		
201645	RampCIS	2012-04-21 11:44:59	83310	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	128		
201632	Ped	2012-04-21 11:13:12	100119	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	256		
201626	Las	2012-04-21 10:48:03	100043	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	256		
201625	Las	2012-04-21 10:45:18	10008	73.05%	7.42%	0.00%	0.00%	256	Samuel Silverstein		
201619	Ped	2012-04-21 10:33:51	10213	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	256		
201617	CIS	2012-04-21 10:30:20	4932	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	256		
201616	MonoCIS	2012-04-21 10:27:47	10028	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	256		
201583	Las	2012-04-20 15:41:24	100168	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	256		
201582	Las	2012-04-20 15:38:30	10245	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	256		
201572	Ped	2012-04-20 15:28:48	10178	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	256		
201571	CIS	2012-04-20 15:24:51	4932	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	256		
201569	MonoCIS	2012-04-20 15:22:39	10155	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	256		
201500	Las	2012-04-19 10:30:10	100027	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	256		
201499	Las	2012-04-19 10:27:04	10120	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	256		

(a) Lista dos dados adquiridos.



(b) Estados gerados automaticamente pelo (c) Gráficos gerados para um determinado DQMF e acesso a informações detalhadas. módulo.

Figura 3.1: *Dashboard Web System*, desenvolvido em 2010 para integrar os dados adquiridos e as análises do grupo de QD do TileCal. Mais detalhes em [5]

É evidente que o cenário descrito é composto por diversas ferramentas (web) para apoiar em diferentes aspectos as análises e operação de forma mais eficiente do TileCal. Tais sistemas foram desenvolvidos em diferentes fases do detector, envolvendo diferentes colaboradores, que não necessariamente ainda encontram-se envolvidos em atividades da colaboração. Além disso, a manutenção de tais ferramentas não é garantida pelos mesmos colaboradores contribuintes. Para a colaboração, seria mais fácil reunir todas as ferramentas existentes em uma única interface, que utilizasse preferencialmente a mesma tecnologia, permitindo inclusive, reutilização de códigos fonte. Tais requisitos foram contemplados com o projeto e desenvolvimento da Plataforma web Tile-in-ONE.

3.1 Fluxo de dados

A Plataforma Tile-in-ONE foi projetada para integrar as diferentes análises realizadas pela colaboração TileCal. Ao fornecer uma estrutura onde os colaboradores podem desenvolver códigos fonte diretamente através da web, ela integra diferen-

tes ferramentas em um único lugar. Isso garante a escolha da mesma tecnologia para todas as ferramentas desenvolvidas (linguagem Python [23]), o que torna a manutenção da plataforma mais fácil. Além disso, existe o incentivo natural para reutilização de códigos, uma vez que os desenvolvimentos encontram-se disponíveis para toda colaboração. Outra funcionalidade oferecida pela plataforma é o encapsulamento em pacotes de configurações para acessar bases de dados importantes para as análises. Isso permite que colaboradores novos não percam tempo aprendendo a acessar a informação, mas foquem na análise propriamente dita.

A figura 3.3 ilustra o fluxo de dados do Tile-in-ONE. A plataforma oferece a funcionalidade de desenvolvimento de códigos pela qual os colaboradores podem escrever seus próprios programas. Também é permitida a edição de códigos salvos ou escritos por outros usuários. Uma vez que o desenvolvimento do código é concluído, o desenvolvedor pode submeter seu código que será manipulado no lado do servidor. Este, por sua vez, irá direcionar o código em questão para uma outra máquina (nesse contexto, máquinas *slaves*), dependendo dos dados identificados pela plataforma que o código fonte a ser executado deseja acessar. Cada máquina *slave* está configurada para acessar um determinado repositório de dados utilizado para as análises da colaboração. Isso permite que os desenvolvedores se abstraiam de configurações de acesso a tais repositórios. A motivação para efetuar a execução do código fonte em outra máquina que não no servidor é evitar que ocorra sobrecarga no servidor principal e o mais importante: caso o código fonte falhe durante a execução, o servidor onde a plataforma está hospedado não fica comprometido. A figura 3.3 ilustra ainda, em vermelho, onde esta tese de mestrado irá atuar. O objetivo é criar uma etapa antes da submissão de novos códigos para máquinas *slave*, atuando, desta forma, como uma camada de segurança cujo intuito é prever quais códigos vão falhar sem a necessidade de executá-los. Esta camada consiste em um novo desenvolvimento e portanto, no momento, qualquer código pode ser submetido para ser executado na máquina *slave*.

Uma vez que o servidor web escolhe uma máquina *slave* esta tenta executar o código fonte submetido e retorna para o servidor web, de maneira estruturada, o que ocorreu durante a execução. Neste momento, o desenvolvedor do código fonte pode utilizar objetos gráficos também fornecidos pela plataforma para exibir os resultados recuperados através de seus códigos fonte. Enfim, o código fonte, a resposta obtida com a execução na máquina *slave* e os objetos gráficos são encapsulados em *Plugins* e disponibilizados em *Dashboards* para toda colaboração.

3.2 Infraestrutura

A figura 3.2 ilustra a infraestrutura atual da plataforma web Tile-in-ONE. Destaca-se em vermelho onde este mestrado pretende atuar.

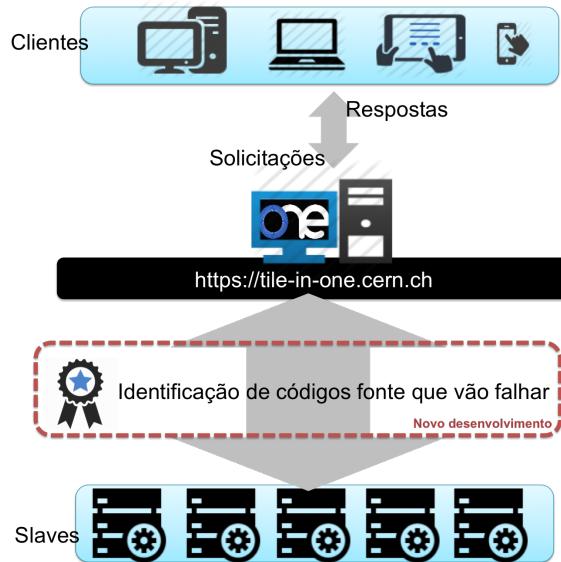


Figura 3.2: Esquemático representando a infraestrutura da plataforma Tile-in-ONE. Em vermelho, a nova camada a ser desenvolvida.

3.3 Novo desenvolvimento

A plataforma Tile-in-ONE está atualmente sendo utilizada pelos grupos de calibração e qualidade de dados do TileCal. Uma preocupação que surgiu ao longo do ano de 2014 foi a execução bem sucedida de códigos fonte sem avaliação prévia. Cada código que enfrenta falhas durante sua execução na máquina *slave* acaba consumindo recursos computacionais que podem comprometer o fluxo de dados da plataforma como um todo. A solução para tal questão levantada é estudada neste mestrado, fazendo uso de técnicas de mineração de códigos fonte, como abordado no capítulo 4.

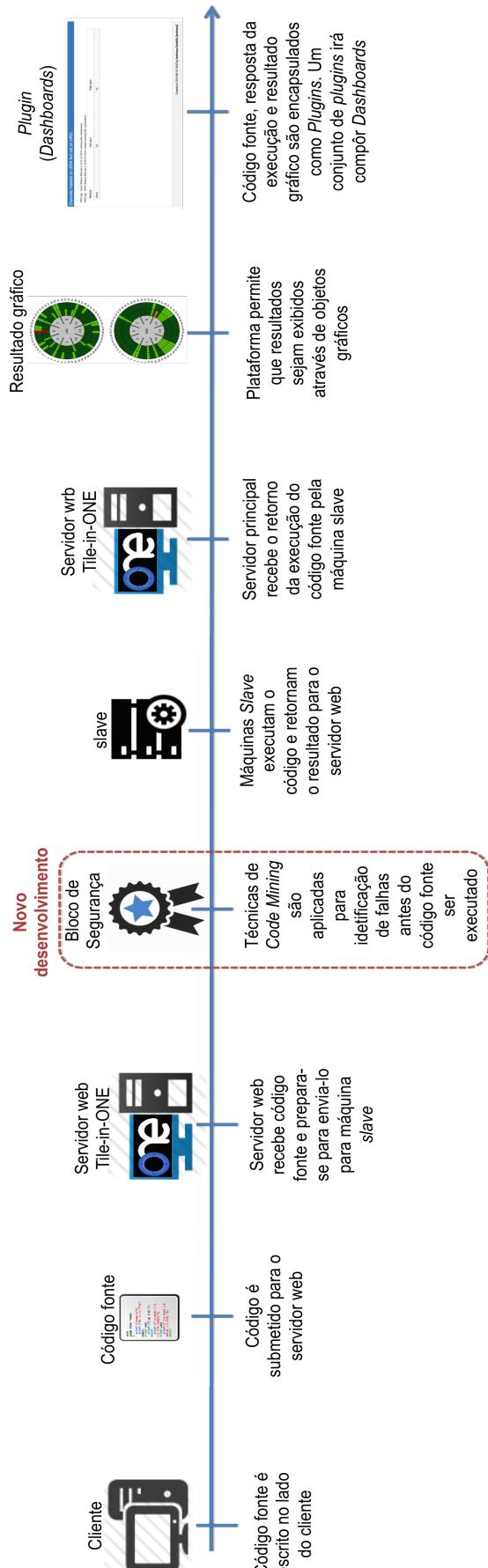


Figura 3.3: Fluxo de dados da plataforma web Tile-in-ONE.

Capítulo 4

Mineração de códigos fonte para identificação de falhas

Em desenvolvimento de software é comum observar que quanto maior for o tempo de permanência de um erro no código mais custosa torna-se a sua correção e manutenção em um projeto [24]. Falhas em códigos fonte são definidas como “Imperfeições durante o desenvolvimento de software que como consequência impedem que o programa atinja as expectativas desejadas.” [25]. Entende-se ainda que muitos defeitos são introduzidos durante o processo de desenvolvimento como um todo, não somente no seu início ou fim. Assim sendo, identificar falhas antecipadamente torna-se parte essencial em desenvolvimento de software, que significa qualidade na entrega final do produto. [26].

O SDLC (do inglês, *software development life cycle* ou ciclo de vida do desenvolvimento de software) [27] indica que o desenvolvimento de software pode ser descrito em cinco etapas:

1. Levantamento de Requisitos
2. Projeto
3. Implementação
4. Teste
5. Implantação

A figura 4.1 ilustra em quais etapas do ciclo de vida de desenvolvimento do software são inseridos. Entidades presentes na área de engenharia de computação (tais como a IBM [28] e HCL [29]) confirmam que cerca de 35% das falhas identificadas em códigos fonte são inseridas na fase de implementação [6].

Atualmente, diferentes técnicas tem sido utilizadas para identificação antecipada de erros em códigos fonte. A análise estática, por exemplo, é bastante utilizada na



Figura 4.1: Estimativa do percentual de erros inseridos durante fases do SDLC.
(Fonte: *Computer Finance Magazine*. Dados extraídos de [6])

área de programação desde a década de 80. As características desta análise são abordadas em 4.2.1. Em conjunto com analisadores estáticos, pode-se aplicar técnicas de mineração de dados, fazendo uma combinação entre a área de engenharia de software e inteligência computacional. No artigo [30], publicado em 2007, os autores abordam como a mineração de dados pode contribuir com a área de engenharia de software, a medida que técnicas de inteligência computacional, quando aplicadas, melhoram a qualidade de projetos. Nesta mesma direção, a MSR (em inglês, *Mining Software Repositories* ou mineração de repositórios de códigos) passa a ser amplamente abordada devido a disponibilidade gratuita de inúmeros repositórios públicos de controle de versionamento, rastreamento de erros inseridos e até mesmo documentações [31].

Aplicar mineração de dados em códigos fonte desperta interesse na comunidade científica, uma vez que códigos são tipicamente estruturados e semanticamente ricos em termos de construtores de programação (tais como variáveis, funções, objetos estruturados e rotinas bem definidas). Os objetivos são diversos: vão desde a tentativa de descobrir o que um determinado software faz (sem necessariamente executá-lo) até manutenção de projetos ou análises de desenvolvimento [32].

Como citado, a identificação antecipada de erros inseridos durante a implementação de códigos fonte é atraente do ponto de vista de qualidade de produto. A utilização de mineração de códigos é uma das aplicações mais ativas em engenharia de software atualmente. Neste caso, o objetivo é obter ferramentas que não só identifiquem falhas (ou *bugs*) mas também sua localização exata nas linhas de códigos do projeto, de tal forma que o seu conserto seja facilitado [32]. Para alcançar esse objetivo, uma direção de bastante destaque consiste na mineração de padrões, que uma vez pré-definidos, são aplicadas em diversos repositórios de projetos já existentes com o objetivo de encontrar anomalias comuns que violam regras ([33], [34], [35]).

Outro objetivo dominante na mineração de códigos é a tentativa de identificar

fragmentos clonados. A não reutilização de códigos dificulta a manutenção do software e ainda, pode proliferar *bugs* em diferentes partes de um projeto.

A seção 4.1 investiga a aplicação de mineração de dados em códigos fonte no CERN; A seção 4.2 aborda quais são os atributos comumente utilizados quando mineração de dados é aplicada em códigos fonte. Esta seção é composta por duas sub-seções (4.2.1 e 4.2.2) que abordam em que situações tais atributos foram utilizados na aplicação de mineração de códigos neste contexto; Por fim, a seção 4.3 descreve métodos de aprendizado de máquina que foram utilizados neste mestrado na tentativa de classificar de códigos fonte em *executáveis/não executáveis*.

4.1 Analisadores estáticos e Mineração de códigos no CERN

O CERN oferece um ambiente para desenvolvimento de software bastante particular. Estima-se que centenas de projetos de software estão sendo desenvolvidos, com propósitos específicos, desde programas que auxiliam o trabalho da equipe de recursos humanos até os que monitoram o desempenho dos diversos experimentos do colisor de partículas. Apesar do setor de TI do CERN ter estipulado algumas regras para a política de segurança, muitos projetos de software pequenos não as seguem a risca. Isso implica em vulnerabilidades de programas utilizados em ambientes de produção no CERN.

As regras de segurança estipuladas não são tão rígidas para estimular o meio acadêmico no avanço das pesquisas científicas. Da mesma maneira, analisadores estáticos para assegurar a qualidade no desenvolvimento de códigos livres não são impostos para a comunidade presente. Existem ferramentas disponíveis e com documentação e suporte da equipe de TI, mas nenhum projeto é obrigado a utilizá-las. No caso deste projeto de mestrado, a linguagem computacional utilizada é o Python, sendo o *PyLint* [36] uma ferramenta de análise estática cuja utilização é incentivada pelo CERN [37].

Recentemente, o setor de segurança em computação do CERN contratou um serviço (*Coverity* [38]) para garantir qualidade no desenvolvimento de novas funcionalidades no seu principal produto de análises físicas (o ROOT [39]). O ROOT é utilizado por cerca de 10.000 pesquisadores e a integridade do software passou a ser vista como algo valioso. Um *bug* perpetrado no ROOT pode ter um impacto muito negativo nas análises de resultados dos dados gerados pelo LHC. Assim que incorporado, o *Coverity* já foi capaz de identificar mais de 40.000 falhas em aproximadamente 50 milhões de linhas de códigos [40]. Um ponto negativo observado por desenvolvedores do ROOT é o tempo necessário para executar o analisador

estático: são 28 horas para cada 2 milhões de linhas de código. É válido observar que a ferramenta escolhida para o ROOT não atende as necessidades deste projeto de mestrado: o *Coverity* atende códigos escritos em linguagem C/C++ enquanto os códigos do Tile-in-ONE (seção 3) são implementados em Python. Além disso, deseja-se aplicar mineração de dados em códigos fonte em um ambiente web.

Em física de altas energias não existem artigos que indiquem a aplicação de mineração de dados em códigos fonte.

4.2 Escolha de atributos

Uma revisão feita por Heckman [41] com 21 artigos sobre mineração de dados em códigos fonte, identifica cinco categorias comumente utilizadas como atributos:

1. *Alert Characteristics* (AC): abordagem que leva em consideração os alertas gerados por analisadores estáticos (sub-seção 4.2.1);
2. *Code Characteristics* (CC): abordagem que considera medidas estatísticas e de qualidade do código fonte como atributos de entrada para algoritmos de máquina de aprendizado(sub-seção 4.2.2);
3. *Source code repository metrics* (SCR): atributos retirados de repositórios de códigos. Nesta abordagem, leva-se em consideração versionamentos (histórico de *bugs* inseridos no projeto), comentários de atualizações e documentação sobre requisitos por exemplo;
4. *Bug database metrics* (BDM): Neste caso, existe uma base de dados para o projeto contendo todos as falhas já surgidas e consertadas. O objetivo dessa abordagem é identificar padrões que podem voltar a acontecer no projeto;
5. *Dynamic analyses metric* (DA): esta abordagem armazena resultados obtidos com análise dinâmica de códigos, mediante diversas execuções (ver seção 4.2.1).

Tais categorias são descritas detalhadamente em [42].

Este mestrado utiliza as duas primeiras abordagens, descritas nas próximas subseções.

4.2.1 Analisadores Estáticos

Em engenharia de software existem dois tipos de análise (complementares) que podem ser feitas para validar e testar o produto em concepção [43]:

- **Estática:** neste caso apenas a estrutura do código é analisada, mas o código não é executado;

- **Dinâmica:** para esta análise, é preciso levantar um plano de testes, executá-los e avaliar os resultados. Ou seja, é necessário executar o código diversas vezes;

Como o objetivo deste mestrado é analisar códigos fonte sem executá-los, utilizar analisadores estáticos torna-se atraente, por definição.

Na década de 80, diversas ferramentas que aplicam análise estática de código começaram a ser desenvolvidas para auxiliar desenvolvedores na implementação de códigos com menos *bugs* [44]. Mas logo um inconveniente surge [45]: a quantidade de alertas gerados pelas ferramentas de análise estática de código (SCAT, do inglês, *Static Code Analysis Tools*) é grande e muitos deles não são acionáveis. Diz-se acionável um alerta que realmente vai impedir o sucesso na execução de um determinado código. Essa classificação é feita manualmente pelo desenvolvedor (que neste caso é o especialista): se o especialista entende que determinado alerta é importante e precisa ser consertado antes da execução do programa, tal alerta é definido como *acionável*. Caso contrário, ele é definido como *não acionável* ([46], [47]).

Empiricamente, existem cerca de 40 alertas para cada mil linhas de código (KLOC, do inglês, *Kilo Lines of Code*) [47]. Desta estimativa, podem ser não acionáveis 30-100%, como observado em [48], [49], [47], [50], [51], [52]. Tais números desestimulam desenvolvedores e projetistas a aplicar ferramentas de análise estática de código no processo de desenvolvimento de software, embora entenda-se a sua importância no quesito qualidade adquirida. Por outro lado, um alerta definido pelo especialista como *acionável* nem sempre vai impedir a execução bem sucedida do código. Ou seja, se por um lado os analisadores estáticos geram muitos alertas (*não acionáveis*), nada garante que o alerta *acionável* indica que o programa contém *bugs* e vai falhar durante a tentativa de execução. Em outras palavras, um analisador estático pode não gerar nenhum alerta e mesmo assim, durante a tentativa de execução, o código ainda pode falhar.

Para este mestrado, um dos atributos utilizados corresponde a geração ou não de alertas pelo analisador estático. Adicionalmente, outras medidas estatísticas e de qualidade, descritas a seguir, compõem a lista inicial de atributos extraídos de códigos fonte(tabela 4.1).

4.2.2 Medidas estatísticas e de qualidade

Em computação, “Halstead Metrics” [53] são medidas de qualidade e estatísticas definidas por Maurice Halstead e publicadas em 1977.

As medidas estatísticas (de Halstead) que podem ser extraídas de um código fonte são:

- η_1 : quantidade de operadores distintos no código;

- η_2 : quantidade de operandos distintos no código;
- N_1 : total de operadores;
- N_2 : total de operandos;

Destas, outras medidas estatísticas são também definidas por Halstead:

- Vocabulário: $\eta = \eta_1 + \eta_2$;
- Tamanho: $N = N_1 + N_2$;
- Volume: $V = N \log_2 \eta$;
- Dificuldade: $D = \frac{\eta_1}{2} \cdot \frac{N_2}{\eta_2}$;
- Esforço: $E = D \cdot V$;
- Estimativa de tempo de execução (em segundos): $T = \frac{E}{18}$;
- Estimativa de potenciais bugs: $B = \frac{V}{3000}$;

Outra característica que pode ser extraída de códigos fonte é a sua complexidade. Define-se como “Cyclomatic Complexity” (do inglês, complexidade ciclomática) [54] o número de decisões que um determinado bloco de código contém mais uma unidade. Este número (também conhecido como *McCabe number*) representa o número de caminhos independentes percorridos durante a execução de um código, quando se monta uma árvore abstrata de sintaxe (AST, do inglês, *abstract syntax tree*) [55].

O índice de manutenabilidade (ou MI, do inglês *Maintainability Index*) é uma medida em software que indica o quanto fácil é a manutenção de um determinado código. O MI é calculado de diferentes maneiras, dependendo da abordagem que se deseja utilizar. Entretanto, a fórmula clássica [56] envolve o número de linhas totais em um código fonte (SLOC, do inglês, *source lines of code*), a complexidade ciclomática (neste contexto, CC) e o volume de Halstead (HV):

$$MI = 171 - 5.2 \ln_{10} HV - 0.23 CC - 16.2 \ln_{10} SLOC.$$

Os autores chegaram nesta fórmula através de um número de códigos fornecidos pela HP, escritos em linguagens de programação C e Pascal. Para cada código, um especialista (engenheiro de software) atribuiu uma nota (de 1 a 100) indicando o quanto fácil seria fazer alterações ou correções posteriores ao determinado código (quanto maior a nota, mais fácil é sua manutenção). Consequentemente, 40 faixas de valores foram identificadas e através de uma regressão estatística, eventualmente, a fórmula exposta foi encontrada como um índice de manutenibilidade. Existe ainda o LLOC (do inglês, *Logic Lines of Code*), que indica a quantidade de linhas com operadores lógicos no código e é outra medida que pode ser extraída como um atributo de códigos fonte.

Tabela 4.1: Lista inicial de atributos

#	Atributo	Descrição
1	Complexidade Ciclomática	Número de declarações
2	Índice de Manutenibilidade	Corresponde à organização do código
3	Vocabulário de Hasllead	# de operadores + # de operandos únicos
4	Tamanho de Halstead	# de operadores + # total de operandos
5	SLOC	Número de linhas do código fonte
6	Volume de Halstead	Combinação entre número de linhas e declarações
7	Dificuldade de Hasllead	Complexidade do código baseada no número de operadores e operandos
8	Tempo de Halstead	Tempo estimado para compilar um código
9	Bugs de Halstead	Possibilidade de bugs serem gerados
10	LLOC	Número de linhas lógicas
11	Alertas PyLint	Verdadeiro se PyLint gerou alertas. Caso contrário, falso

A tabela 4.1 lista os atributos inicialmente extraídos e uma breve descrição. Uma análise de relevância e correlação foi realizada. Os resultados são apresentados na seção 5.2.

4.3 Métodos *ensemble* em Árvores de Decisão

Árvore de decisão (DT, do inglês, *Decision Tree*) [7] é um algoritmo de aprendizado de máquina supervisionado. O termo “supervisionado” indica que, durante a fase de treinamento, as classes (ou alvos) são conhecidas. Desta maneira, o classificador aprende com casos em que se sabe a resposta (*executável/não executável*).

Basicamente, o treinamento de uma árvore de decisão divide e agrupa o conjunto de treino em dois ou mais grupos homogêneos, sucessivamente. Para as divisões, o algoritmo se encarrega de escolher qual é o atributo mais significativo, ou seja, qual atributo irá tornar a divisão o mais homogênea (ou pura) possível. Tal processo consiste no que se conhece como *splitting* e será descrito mais adiante nesta seção.

A figura[XXX] ilustra um exemplo clássico de árvore de decisão. Ele representa uma árvore que decide se uma pessoa vai ou não jogar tênis. Os atributos utilizados são condições do tempo (ensolarado, nublado ou chuvoso), umidade (alta ou baixa) e vento (forte ou fraco).

Ainda sobre a figura[XXX], o conhecimento de algumas nomenclaturas é necessário. Elas serão referenciadas mais adiante. São elas:

- O nó raiz (em azul) representa todo o conjunto de treino e é onde as divisões em grupos homogêneos começa.
- Os nós que continuam dividindo os sub-conjuntos restantes (em cinza) são denominados nós de decisão.
- Quando a divisão cessa, tem-se folhas (em verde). As folhas indicam a decisão tomada pela árvore treinada.

Existem duas operações relacionadas ao treinamento de árvores de decisão. Elas estão descritas a seguir.

Splitting

Pruning

Uma das vantagens em se utilizar árvores de decisão para classificação é a sua fácil compreensão. Para pessoas sem conhecimentos em inteligência computacional, o treinamento de classificadores e os resultados obtidos são de fácil compreensão. Além disso, a representação gráfica é intuitiva e permite que hipóteses sejam rapidamente relacionadas.

Entretanto, existe uma desvantagem que faz com que árvores de decisão não sejam consideradas classificadores fortes: o fato de dividir conjuntos em sub-conjuntos homogêneos faz com que o classificador gerado fique especialista no conjunto de treino (*overfit*). Ou seja, a árvore gerada sempre dependerá do conjunto de treino utilizado. O método *ensemble* contorna essa questão levantada.

Ensemble são conjuntos de classificadores que combinam seus resultados individuais (por votação ou média ponderada) para classificar novas amostras [57]. Uma das áreas mais ativas na área de aprendizado de máquina supervisionado tem sido *ensemble* [58]. Geralmente, classificadores *ensemble* apresentam maior acurácia que classificadores individuais. A razão estatística para isso é que a variância de um somatório é menor que a variância individual. Computacionalmente, o treinamento pode dar-se de maneira mais rápida, uma vez que, em alguns casos é possível paralelizar a fase de treinamento.

Classificadores *ensemble* podem ser gerados com qualquer algoritmo base, inclusive árvores de decisão. Tais classificadores são descritos nas sub-seções a seguir.

4.3.1 Bagged Trees (*Bootstrap Aggregating*)

Apesar do nome, *Bagged Trees* pode ser utilizado com qualquer algoritmo base. Neste tipo de *ensemble*, um sub-conjunto com N elementos do conjunto de treino

é selecionado para o treinamento de um classificador. Em seguida, um novo sub-conjunto com outros N elementos é utilizado para gerar um outro classificador. Esse procedimento é repetido, até que um número total e pré-definido de classificadores seja gerado. A classificação final dá-se por voto majoritário. A figura 4.2 ilustra um pseudo-código que descreve como *Bagged Trees* é treinado e utilizado para classificações.

```

BAGGING
Training phase
1. Initialize the parameters
   •  $\mathcal{D} = \emptyset$ , the ensemble.
   •  $L$ , the number of classifiers to train.

2. For  $k = 1, \dots, L$ 
   • Take a bootstrap sample  $S_k$  from  $\mathbf{Z}$ .
   • Build a classifier  $D_k$  using  $S_k$  as the training set.
   • Add the classifier to the current ensemble,  $\mathcal{D} = \mathcal{D} \cup D_k$ .

3. Return  $\mathcal{D}$ .

Classification phase
4. Run  $D_1, \dots, D_L$  on the input  $\mathbf{x}$ .
5. The class with the maximum number of votes is chosen as the label
   for  $\mathbf{x}$ .

```

Figura 4.2: *Bagged Trees* pseudo-código. Retirado de [7].

4.3.2 Random Forest

Alguns autores consideram *Random Forest* como uma variação de *Bagged Trees* [58]. Este classificador *ensemble* é apresentado por Breiman em [59].

A primeira diferença é que *Random Forest* só utiliza árvores de decisão como algoritmo base. Outra diferença entre os dois algoritmos é a quantidade de atributos utilizados durante o treinamento dos classificadores: neste caso, nem todos os atributos são utilizados. Escolhe-se a quantidade de atributos que será utilizada e a cada nova árvore, um sub-conjunto diferente de atributos é utilizado. Isso permite analisar a contribuição de cada atributo no treinamento de cada árvore.

O termo *Out of Bag (OOB)* também é introduzido por Breiman. Assim, tem-se uma nova medida para erro: cerca de um terço do conjunto de treino é separada e utilizada a cada rodada como um conjunto de teste. É a partir desta medida que a análise de contribuição dos atributos torna-se possível.

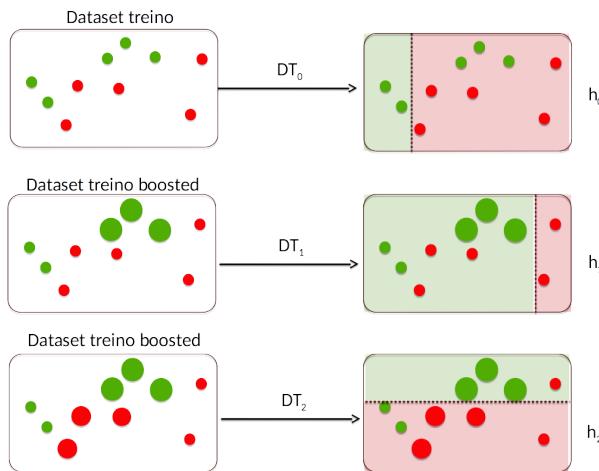
Similar ao *Bagged Trees*, o resultado final dá-se por voto majoritário.

4.3.3 Boosted Decision Trees (BDT)

Este é outro algoritmo *ensemble* que não exige apenas árvores de decisão como classificador base. Diferentemente dos casos anteriores, todo o conjunto de treino é

utilizado para gerar o classificador. Mas, a cada rodada, verifica-se quais amostras foram erroneamente classificadas e atribui-se um peso a elas. Desta maneira, na próxima iteração, os casos equivocados estarão evidenciados. A figura 4.3(a) ilustra o que ocorre com o conjunto de treino a cada rodada: dadas duas classes, verde e vermelha, ao gerar o primeiro classificador, temos 3 amostras erroneamente classificadas (*misclassifieds*). Em outras palavras, temos 3 amostras que pertencem à classe verde, mas o classificador gerado atribuiu a classe vermelha a elas. Em uma próxima iteração, tais amostras serão multiplicadas por um fator que influenciará o treinamento. O resultado final ocorre por voto majoritário.

É interessante observar na figura 4.3(b) que a combinação de diversos classificadores gera um classificador refinado.



(a) Exemplo do que ocorre com o conjunto de treino durante as iterações do BDT

$$\hat{y} = \sum_{n=1}^N \alpha_n h_n$$

α_0
 +
 α_1
 +
 α_2

The diagram shows the mathematical expression for the final prediction \hat{y} as a weighted sum of base classifiers h_n . The weights are represented by rectangles of varying widths: α_0 (green), α_1 (green), and α_2 (red). These weights are summed to produce the final prediction, which is then compared with the original dataset to show the improved classification regions.

(b) O resultado final é por voto majoritário.

Figura 4.3: Ilustração do método BDT. Baseado em [8].

Capítulo 5

Métodos utilizados e Discussão de resultados

As seções 5.1 e 5.2 descrevem, respectivamente, o conjunto de dados adquiridos e os atributos que foram previamente selecionados; A seção 4.3 descreve os algoritmos de máquina de aprendizado utilizados;

Em seguida o capítulo apresenta uma discussão do desempenho obtido pelos classificadores *ensemble*.

5.1 Aquisição de códigos fonte

O Tile-in-ONE encontra-se em produção, sendo utilizado pelos grupos de calibração e qualidade de dados do TileCal desde 2014. Em seu banco de dados, existe um total de 512 códigos de Plugins, desenvolvidos pelos colaboradores através da plataforma web. A figura 5.1 corresponde a quantidade de códigos fonte implementados no período de Junho de 2014 a Dezembro de 2015.

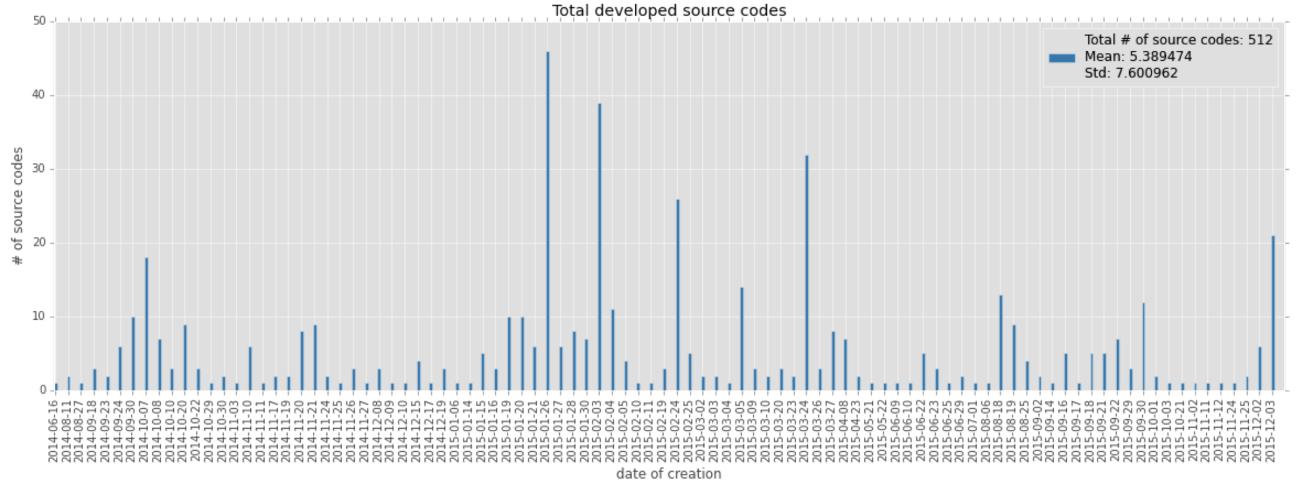


Figura 5.1: Total de códigos fonte escritos (512) entre Junho/2014 e Dezembro/2015.

Dos 512 códigos que compõem o conjunto de dados, quase 30% não obtiveram sucesso ao serem enviados para uma máquina *slave*. De acordo com a figura 5.2, percebe-se que 8,59% não retornaram nenhum tipo de resposta para o servidor principal, o que pode significar que a máquina *slave* escolhida para executar o código fonte em questão estava sem comunicação. Isso não significa necessariamente que o código fonte é *não executável*, uma vez que ele nem sequer chegou na máquina *slave*. Os 21,09% restantes correspondem a programas que falharam durante a tentativa de execução. Mas novamente, não é possível afirmar neste momento que tais códigos são *não executáveis*. Se por ventura, algum desses tentou acessar um banco de dados (externo a plataforma) que no momento da execução estava inacessível, a máquina *slave* retornou falha e, neste caso, o problema não foi o código fonte. Talvez no futuro, esse tipo de informação possa se tornar uma entrada para o classificador: caso o código fonte esteja acessando uma fonte externa ele pode ser penalizado.

Source codes execution performance (slave machines)

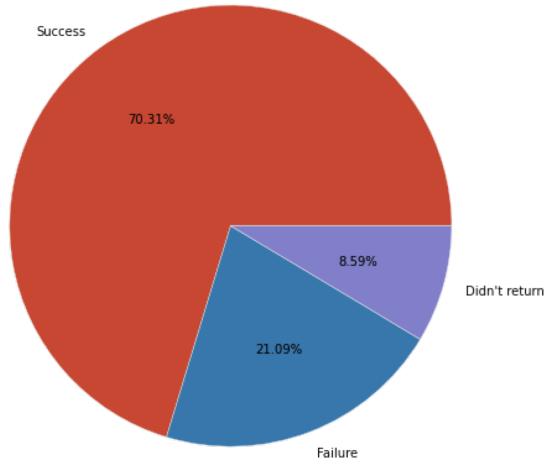


Figura 5.2: Retornos obtidos após tentativa de executar códigos fonte em máquinas *slave*.

Após avaliar os 512 códigos, e comparar com a aplicação do analisador estático (PyLint), percebe-se que 82,02% dos códigos são *executáveis*, mas em quase 20% dos casos o PyLint gera algum tipo de alerta. Do restante, menos de 1% é *não executável* devido a erros de sintaxe em Python, mas podem ser facilmente identificados ao executar o analisador estático. Dos outros quase 17% *não executáveis*, cerca de 5% não podem ser identificados apenas com a aplicação do Pylint. A figura 5.3 ilustra esses percentuais.

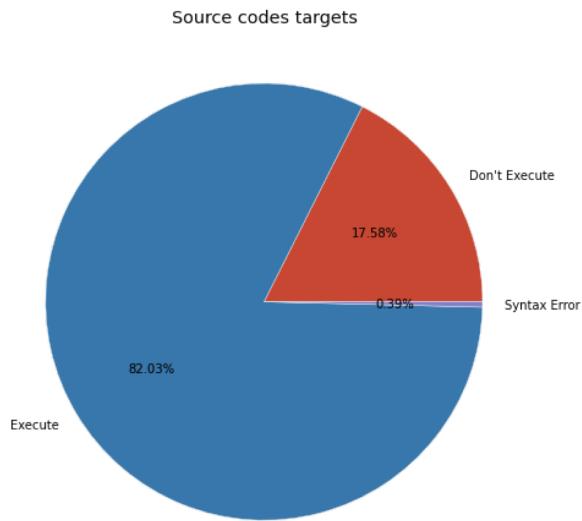


Figura 5.3: Percentuais de alvos do conjunto de códigos fonte.

Em suma, a aplicação do analisador estático não é suficiente para classificar

um código como *executável* ou *não executável*. Uma ferramenta adicional faz-se necessária.

5.2 Análise de atributos

A tabela 4.1 descreve os 11 atributos inicialmente extraídos dos códigos fonte disponíveis na base de dados da plataforma Tile-in-ONE. Ao gerar a matriz de correlação entre tais atributos (figura 5.4), percebe-se que os atributos relacionados às medidas e estatísticas de Halstead são fortemente correlacionados.

	CC	M _I	H. Vocabulary	H. Length	SLOC	H. Volume	H. Difficulty	H. Req Time	H. Bugs	LLOC	PyLint Alerts
Cyclomatic Complexity	1	-0.26	0.6	0.6	0.61	0.54	0.58	0.61	0.64	0.27	0.18
Maintainability Index	-0.26	1	-0.56	-0.53	-0.47	-0.68	-0.39	-0.47	-0.5	-0.45	-0.22
Halstead Vocabulary	0.6	-0.56	1	1	0.99	0.91	0.94	0.99	0.98	0.16	0.26
Halstead Length	0.6	-0.53	1	1	0.99	0.89	0.95	0.99	0.98	0.1	0.26
SLOC	0.61	-0.47	0.99	0.99	1	0.84	0.97	1	0.98	0.033	0.25
Halstead Volume	0.54	-0.68	0.91	0.89	0.84	1	0.79	0.84	0.88	0.38	0.25
Halstead Difficulty	0.58	-0.39	0.94	0.95	0.97	0.79	1	0.97	0.96	-0.068	0.21
Halstead Required Time	0.61	-0.47	0.99	0.99	1	0.84	0.97	1	0.98	0.033	0.25
Halstead Bugs	0.64	-0.5	0.98	0.98	0.98	0.88	0.96	0.98	1	0.12	0.27
LLOC	0.27	-0.45	0.16	0.1	0.033	0.38	-0.068	0.033	0.12	1	0.11
PyLint Alerts	0.18	-0.22	0.26	0.26	0.25	0.25	0.21	0.25	0.27	0.11	1

Figura 5.4: Matriz de correlação dos 11 atributos extraídos inicialmente

O teste χ^2 foi aplicado para entender, dentre os atributos relacionados a Halstead, quais são os dois mais relevantes. Em outras palavras, dentre os atributos correlacionados, deseja-se utilizar os dois mais independentes, segundo o teste χ^2 . Para este caso, os atributos vencedores são: *Halstead Volume* e *Required Time*. A nova matriz de correlação calculada (figura 5.5) demonstra que os 6 atributos selecionados (tabela 5.1) são suficientemente independentes entre si (com exceção das medidas de Halstead). Observa-se ainda a independência dos atributos selecionados com o alvo, como ilustrado na figura 5.5.

Tabela 5.1: Lista de atributos selecionados

#	Atributo	Descrição
1	Complexidade Ciclomática	Número de declarações
2	Índice de Manutenibilidade	Corresponde à organização do código
3	Volume de Halstead	Combinação entre número de linhas e declarações
4	Tempo de Halstead	Tempo estimado para compilar um código
5	LLOC	Número de linhas lógicas
6	Alertas PyLint	Verdadeiro se PyLint gerou alertas. Caso contrário, falso

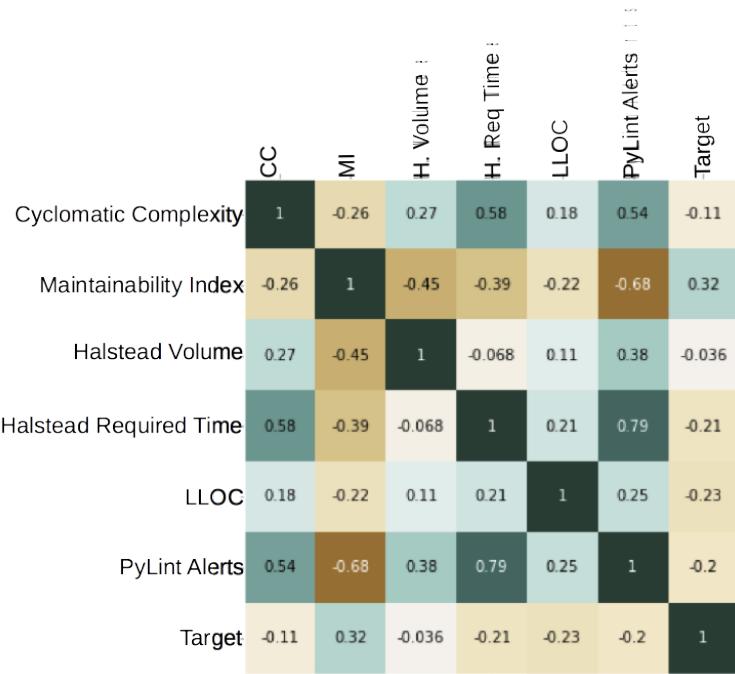


Figura 5.5: Matriz de correlação dos 6 atributos selecionados. As correlações com a saída também são calculadas.

5.3 Avaliação dos Classificadores

Em Física de Altas Energias, é comum encontrar a aplicação de BDT (*Boosted Decision Tree*, ver seção 4.3.3) para identificação de partículas. No Farmilab, por exemplo, as análises para busca de oscilações de neutrinos deu-se por meio de aplicação de BDT [60]. No CERN existem diversos trabalhos utilizando BDT para identificação do Bóson de Higgs. Portanto, existe um incentivo natural para a aplicação de métodos *ensemble* com árvores neste projeto contextualizado no ambiente do CERN. Como citado, a popularidade de árvores de decisão na comunidade

científica vem da sua fácil compreensão.

Com os atributos selecionados (seção 5.2), classificadores em *ensemble* foram treinados. Para todos os casos, o algoritmo base é uma árvore de decisão, gerada previamente. O objetivo em se treinar mais de um classificador é avaliar se o problema a ser resolvido tem solução. Como saídas, teremos as classes *executável* indicando que provavelmente o código fonte não vai falhar ao ser executado na máquina *slave* ou, caso contrário, *não executável*.

Antes de dividir o conjunto de dados em subconjuntos de treino (70%) e teste (30%), foi necessário replicar o conjunto com alvo *não executável*, devido a desproporção em número de amostras. É importante ressaltar que os mesmos conjuntos de treino e teste foram utilizados para todos os casos.

Como avaliação de performance, foram avaliadas as matrizes de confusão e os F1-scores. Em análises estatísticas de classificação binária, o F1-score é uma medida de acurácia. Ela considera tanto precisão quanto sensibilidade, como pode ser observado pela fórmula abaixo:

$$F1_{score} = 2 \cdot \frac{p \cdot r}{p + r}$$

, onde p é precisão e r é sensibilidade.

Precisão é o número de verdadeiro positivos dividido pelo número total de resultados positivos. Sensibilidade é o número de verdadeiro positivos dividido pelo número de resultados positivos que deveriam ter sido retornados.

O F1-score pode ser interpretado como uma média ponderada da precisão e sensibilidade, onde o melhor valor para avaliar a acurácia é 1 e o pior, 0.

Árvore de decisão

O critério *gini* para divisão da árvore de decisão foi utilizado. Estipulou-se um tamanho máximo igual a três, a fim de evitar *overfitting*. O esperado é que este classificador tenha uma acurácia pior do que os demais. Esta árvore foi utilizada como classificador base nos três métodos *ensemble* utilizados descritos a seguir.

Bagged Trees

Utilizando o mesmo conjunto de treino utilizado para treinar o classificador base e, utilizando a árvore de decisão descrita anteriormente, um classificador em *Bagged Tree* foi gerado. No caso, o número de iterações estabelecido é igual a 100. Ou seja, ao final do treinamento, tem-se 100 árvores treinadas. O resultado dá-se por voto majoritário dessas 100 árvores. A cada rodada, 10% do conjunto de treino foi utilizado como sub-conjunto *bootstrap* (o equivalente a cerca de 60 amostras).

Isso é o suficiente para garantir que as amostras não sejam repetidas inúmeras vezes, o que mantém a independência dos 100 classificadores gerados pelo método.

Random Forest

Para o classificador em *Random Forest* os mesmos critérios estabelecidos para treinar o *Bagged Tree* se aplicam. Mas, o que difere os dois métodos é a quantidade de atributos utilizados em cada iteração para treinar uma árvore. Em [59], o Breiman avalia que empiricamente, um número de atributos próximo a \sqrt{N} (sendo N o número total de atributos) é suficiente para obter melhor acurácia. No caso abordado nesta dissertação, temos um número de atributos pequeno (e igual a 6), de tal forma que $\sqrt{6} = 2.45$. O número de atributos, então, utilizado para treinar o classificador em *Random Forest* é igual a 3. Como o *OOB error* é calculado a cada iteração, uma análise de relevância de atributos também pode ser extraída durante o treinamento deste classificador.

Boosted Decision Trees

Apesar deste método permitir treinamento por *cross-validation*, o mesmo procedimento utilizado para treinar os classificadores descritos anteriormente foi utilizado (70% do conjunto para treino e 30% para teste). O motivo dessa escolha é permitir que a análise de performance seja mais justa. Existem diversos algoritmos que determinam como os pesos que serão atribuídos às amostras erroneamente classificadas em cada iteração são definidos. No caso, o algoritmo *AdaBoost* [61] (do inglês, *Adaptative Boosting*) foi utilizado. Inicialmente, os pesos atribuídos equivalem a 1. A cada iteração o percentual de amostras classificadas de maneira equivocada é calculado e o peso que será atribuído a tais amostras é definido baseado neste percentual. O resultado final dependerá também deste peso calculado a cada iteração.

A figura 5.6 ilustra um pseudo-código extraído de [61]. Nela é possível entender como o peso β é calculado, e também como o resultado final é obtido.

Algorithm AdaBoost
Input: sequence of N labeled examples $\langle (x_1, y_1), \dots, (x_N, y_N) \rangle$
distribution D over the N examples
weak learning algorithm **WeakLearn**
integer T specifying number of iterations
Initialize the weight vector: $w_i^1 = D(i)$ for $i = 1, \dots, N$.
Do for $t = 1, 2, \dots, T$

1. Set

$$\mathbf{p}^t = \frac{\mathbf{w}^t}{\sum_{i=1}^N w_i^t}$$

2. Call **WeakLearn**, providing it with the distribution \mathbf{p}^t ; get back a hypothesis $h_t: X \rightarrow [0, 1]$.
3. Calculate the error of h_t : $\varepsilon_t = \sum_{i=1}^N p_i^t |h_t(x_i) - y_i|$.
4. Set $\beta_t = \varepsilon_t / (1 - \varepsilon_t)$.
5. Set the new weights vector to be

$$w_i^{t+1} = w_i^t \beta_t^{1 - |h_t(x_i) - y_i|}$$

Output the hypothesis

$$h_f(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } \sum_{t=1}^T (\log 1/\beta_t) h_t(x) \geq \frac{1}{2} \sum_{t=1}^T \log 1/\beta_t \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

Figura 5.6: Pseudo-código do algoritmo *AdaBoost*

Foram gerados, ao todo, 4 classificadores e a comparação dos resultados é feita através de matrizes de confusão e F1-score. A base de dados é composta por códigos submetidos através da plataforma web Tile-in-ONE. Inicialmente, foi necessário fazer o balanceamento das amostras. Além disso, 70% do conjunto foi separado para treino e 30% para teste. Alguns dos métodos não permite treinamento por *cross-validation* e para uma avaliação justa, a mesma metodologia foi aplicada em todos os treinamentos.

As figuras 5.7 e 5.8 ilustram as matrizes de confusão e algumas medidas de desempenho, respectivamente, que foram geradas utilizando o mesmo conjunto de teste para os 4 classificadores gerados.

No caso da árvore de decisão, é esperado que seu desempenho seja pior comparativamente: o tamanho fixado em três e o número máximo de folhas fixado em cinco impede que ao final, o classificador gerado possua folhas mais puras. A vantagem dessa abordagem é que desta maneira, é mais difícil obter *overfitting*. Por outro lado, uma árvore de decisão é insuficiente para se obter generalização.

Tais questões são contornadas com a aplicação dos métodos *ensemble*, como previsto na teoria. Dos classificadores gerados por tal método, obtém-se melhor desempenho com o BDT, mesmo que o treinamento não seja feito por *cross-validation*. Percebe-se que o número de iterações estabelecida em 100 já é suficiente para atingir tal desempenho. Como ilustrado na figura 5.8(d), o classificador apresenta cerca de 90% para precisão e sensibilidade nas duas classes (*executável* e *não executável*).

O classificador *Bagged Trees* é capaz de melhorar um pouco a classificação quando

comparado com a árvore de decisão gerada. Isto também está coerente com a teoria. Gerar 100 árvores de decisão com sub-conjuntos diferentes aumenta a diversidade dos 70% do conjunto de treino. Tal procedimento é comparável ao treinamento por *cross-validation*. Isso explica o melhor desempenho deste classificador quando comparado com a árvore de decisão treinada.

Além da variação ocorrida no treinamento para gerar o classificador *Bagged Trees*, o *Random Forest* varia também a quantidade de atributos utilizados no momento do treinamento das 100 árvores de decisão em cada iteração. Esse fato, além de melhorar o desempenho da classificação, permite que uma avaliação de atributos mais relevantes seja feita. Em outras palavras, a cada árvore gerada é possível obter o erro *OOB* e, avalia-lo de acordo com os atributos que participaram daquela iteração. A figura 5.9 ilustra através de um gráfico de barras quais são os atributos mais relevantes dos 6 (listados na tabela 5.1) utilizados para o treinamento da *Random Forest*. É possível perceber que o índice de manutenabilidade é o atributo que mais contribui para o treinamento do classificador. A complexidade ciclomática chega a ser menos relevante até que as medidas de Halstead.

A tabela 5.2 apresenta as medidas de desempenho dos 4 classificadores gerados. Nela é possível identificar o melhor desempenho pelo F1-score do BDT sob os demais classificadores.

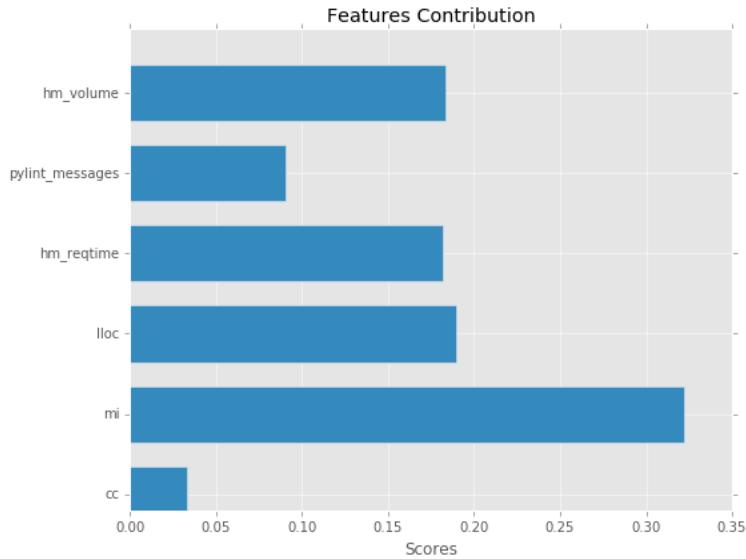


Figura 5.9: Atributos mais relevantes de acordo com erro OOB

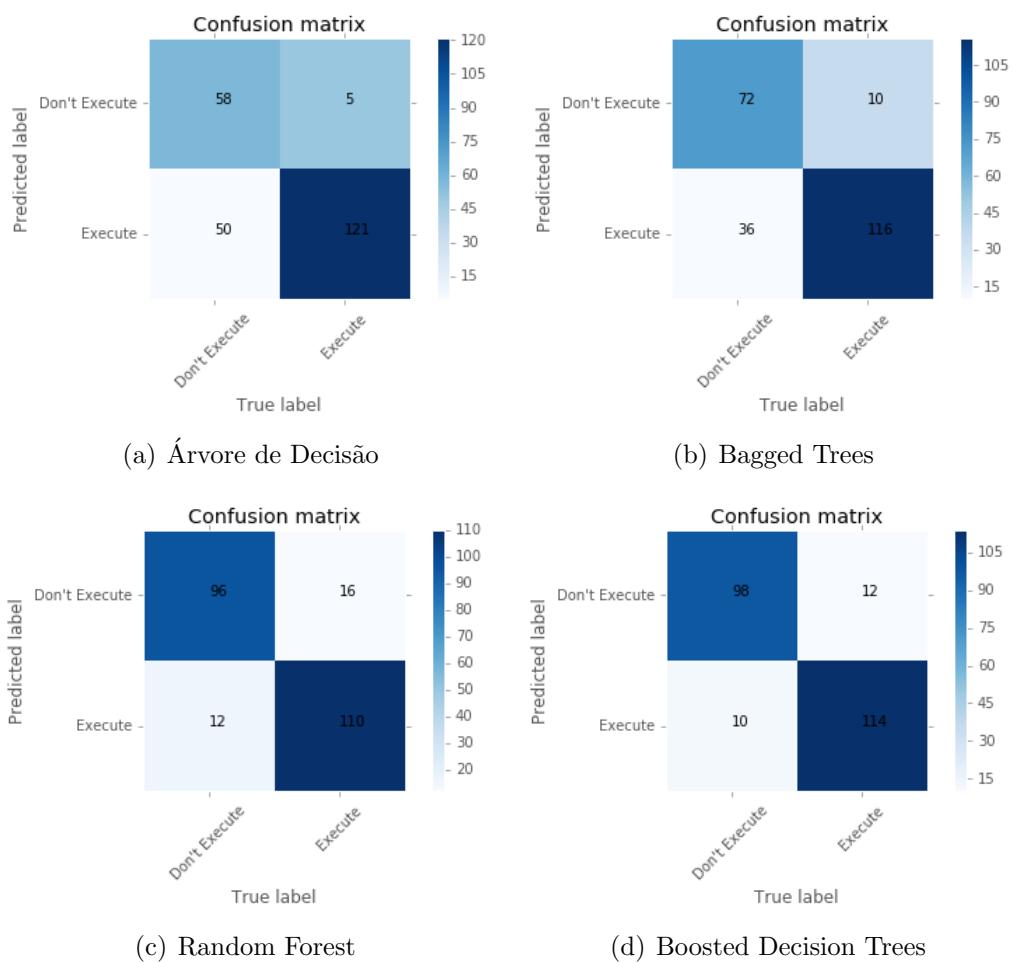
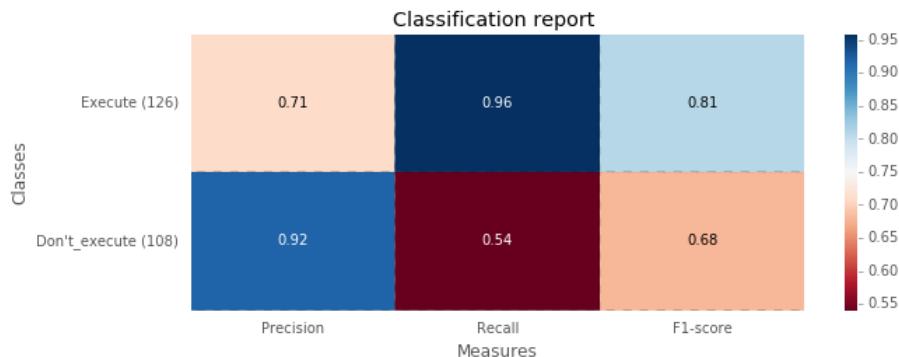
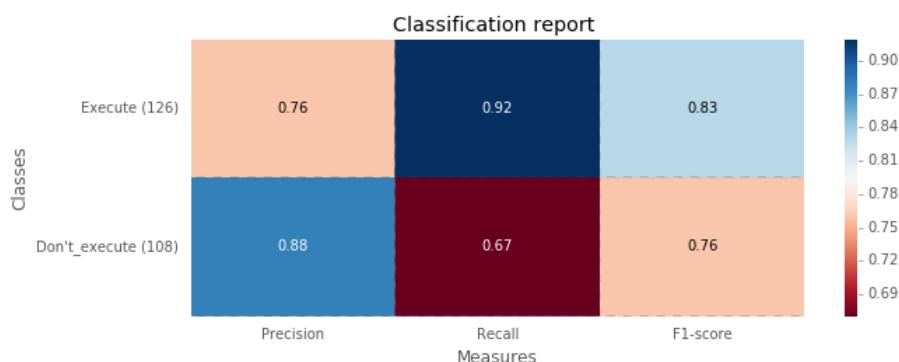


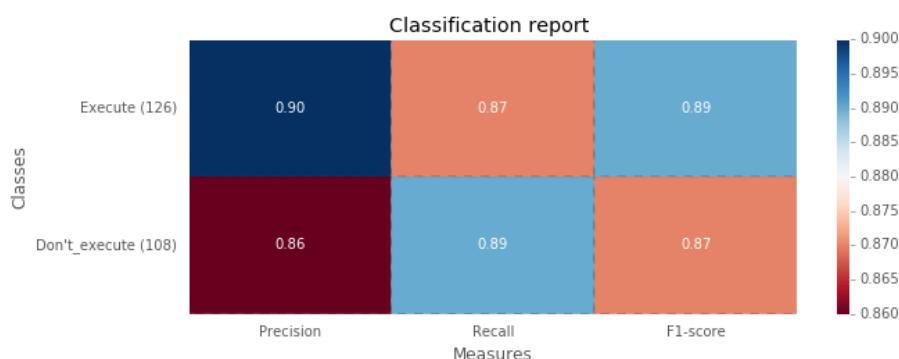
Figura 5.7: Matrizes de Confusão dos 4 classificadores gerados.



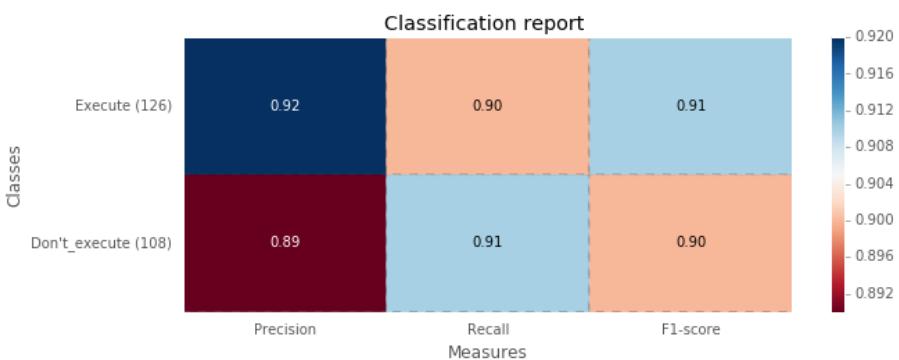
(a) Árvore de Decisão



(b) Bagged Trees



(c) Random Forest



(d) Boosted Decision Trees

Figura 5.8: Medidas de desempenho dos 4 classificadores gerados.

Tabela 5.2: Resumo das medidas de desempenho dos 4 classificadores gerados

Classificador / Classes	Precisão (Precision)		Sensibilidade (Recall)		F1-Score	
	Executável	Não executável	Executável	Não executável	Executável	Não executável
Árvore de Decisão	0.71	0.92	0.96	0.54	0.81	0.64
Bagged Trees	0.76	0.88	0.92	0.67	0.83	0.76
Random Forest	0.90	0.86	0.87	0.89	0.89	0.87
Boosted Decision Trees	0.92	0.89	0.90	0.91	0.91	0.90

Capítulo 6

Conclusões

Referências Bibliográficas

- [1] “CDS - CERN Document Server”,
Acessado em janeiro de 2016. cds.cern.ch.
- [2] “ATLAS Photos”,
Acessado em janeiro de 2016. <http://www.atlas.ch/photos/>.
- [3] ATLAS COLLABORATION, *ATLAS: Technical Proposal for a General-Purpose pp Experiment at the Large Hadron Collider at CERN*, Tech. rep., CERN, 1994, CERN/LHCC 94–43.
- [4] ATLAS/TILE CALORIMETER COLLABORATION, *Tile Calorimeter Calorimeter Technical Design Report*, Tech. rep., CERN, 1996, CERN/LHCC 96–42.
- [5] BALABRAM, C. M. F. F. G. A. S. L., “Web System for Data Quality Assessment of Tile Calorimeter During the ATLAS Operation”, *Journal of Physics: Conference Series (JPCS)*, v. 331 - part 4, 2011.
- [6] PRAKASH, A., ASHOKA, D., ARADYA, V., “Application of Data Mining Techniques for Defect Detection and Classification”. In: *Proceeding of 3rd International Conference on Frontiers of Intelligent Computing: Theory and Applications. FICTA 2014. Advances in Intelligent Systems and Computing 327.*, v. 1, pp. 387–395, 2015.
- [7] ROKACH, L., MAIMON, O., *Data Mining with Decision Trees: Theory and Applications*. World Scientific Publishing Co., Inc.: River Edge, NJ, USA, 2008.
- [8] DUDA, R. O., HART, P. E., STORK, D. G., *Pattern Classification (2Nd Edition)*. Wiley-Interscience, 2000.
- [9] “The European Laboratory for Particle Physics”,
Acessado em janeiro de 2016. <http://www.cern.ch>.
- [10] “The Large Hadron Collider”,
Acessado em janeiro de 2016. <http://lhc.web.cern.ch>.

- [11] GRIFFTHS, D., *Introduction to Elementary Particles*. John Wiley & Sons, 1987.
- [12] “The Nobel Prize in Physics 2013”,
Acessado em fevereiro de 2016.
http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2013/press.pdf.
- [13] THE ALICE COLLABORATION, “The ALICE experiment at the CERN LHC”, *Journal of Instrumentation*, v. 3, n. 08, Aug. 2008.
- [14] THE CMS COLLABORATION, “The CMS experiment at the CERN LHC”, *Journal of Instrumentation*, v. 3, n. 08, Ago 2008.
- [15] SZUMLAK, T., “The LHCb experiment”, *Acta Physica Polonica. Series B: Elementary Particle Physics, Nuclear Physics, Statistical Physics, Theory of Relativity, Field Theory*, v. 41, n. 7, pp. 1661–1668, 2010.
- [16] “ATLAS Factsheet”,
Acessado em janeiro de 2016.
http://www.atlas.ch/pdf/fact_sheet_1page.pdf.
- [17] JENNI, P., NESSI, M., NORDBERG, M., et al., “ATLAS high-level trigger, data-acquisition and controls: Technical Design Report”, *Technical Design Report ATLAS. CERN, Genebra*, v. 42, 2003.
- [18] P. CALAFIURA AND W. LAVRIJSEN AND OTHERS, “The athena control framework in production, new developments and lessons learned”, *Journal of Physics: Conference Series*, pp. 456–458, 2004.
- [19] CORSO-RADU, A., HADAVAND, H., HAUSCHILD, M., et al., “Data Quality Monitoring Framework for the ATLAS Experiment at the LHC”, *IEEE Xplore Digital Library*, v. 55, 2008.
- [20] VERDUCCI, M., “ATLAS conditions database experience with the LCG COOL conditions database project”, *Journal of Physics: Conference Series (JPCS)*, v. 119 - part 4, 2008.
- [21] SIVOLELLA, A., MAIDANTCHIK, C., “The Monitoring and Calibration Web Systems for the ATLAS Tile Calorimeter Data Quality Analysis”, *Journal of Physics: Conference Series 052037, Computing High Energy Physics, New York, USA*, v. 396, pp. 8, May 2012.

- [22] MAIDANTCHIK, C., FERREIRA, F., GRAEL, F., “DCS Web System”, *Journal of Physics: Conference Series, Computing High Energy Physics, Praga, Rep. Tcheca*, pp. 8, March 2009.
- [23] “Python Programming Language”,
Acessado em janeiro de 2016.
<http://www.python.org/>.
- [24] MCCONNEL, S., “An ounce of prevention”, *IEEE software*, May/June 2001.
- [25] KUMARESH, S., BASKARAN, R., “Defect Analysis and Prevention for Software Process Quality Improvement”, *International Journal of Computer Applications (0975 - 8887)*, v. 8, n. 7, October 2010.
- [26] CHILLAREGE, R., BHANDARI, I., CHAAR, J., et al., “Orthogonal Defect Classification - A Concept for In-Process Measurements”, *IEEE Transactions on Software Engineering*, v. 18, n. 11, November 1992.
- [27] VELMOUROUGAN, S., DHAVACHELVAN, P., BASKARAN, R., et al., “Software Development Life Cycle Model to Improve Maintainability of Software Applications”. In: *Advances in Computing and Communications (ICACC), 2014 Fourth International Conference on*, pp. 270–273, Aug 2014.
- [28] “IBM”,
Acessado em janeiro de 2016.
<http://www.ibm.com/us-en/>.
- [29] “HCL”,
Acessado em janeiro de 2016.
<http://www.hcl.com/>.
- [30] XIE, T., PEI, J., HASSAN, A., “Mining Software Engineering Data”. In: *Software Engineering - Companion, 2007. ICSE 2007 Companion. 29th International Conference on*, pp. 172–173, May 2007.
- [31] HASSAN, A., “The road ahead for Mining Software Repositories”. In: *Frontiers of Software Maintenance, 2008. FoSM 2008.*, pp. 48–57, Sept 2008.
- [32] KHATOON, S., LI, G., MAHMOOD, A., “Comparison and evaluation of source code mining tools and techniques: A qualitative approach”. v. 17, pp. 459–484, May 2013.

- [33] LI, Z., ZHOU, Y., “PR-Miner: automatically extracting implicit programming rules and detecting violations in large software code”. In: *In Proc. 10th European Software Engineering Conference held jointly with 13th ACM SIGSOFT International Symposium on Foundations of Software Engineering (ESEC/FSE 2005)*, pp. 306–315, ACM Press, 2005.
- [34] KRISHNA RAMANATHAN, M., GRAMA, A., JAGANNATHAN, S., “Path-Sensitive Inference of Function Precedence Protocols”. In: *Software Engineering, 2007. ICSE 2007. 29th International Conference on*, pp. 240–250, May 2007.
- [35] CHANG, R.-Y., PODGURSKI, A., YANG, J., “Finding What’s Not There: A New Approach to Revealing Neglected Conditions in Software”. In: *Proceedings of the 2007 International Symposium on Software Testing and Analysis, ISSTA ’07*, pp. 163–173, ACM: New York, NY, USA, 2007.
- [36] “PyLint - Static Analysis Tool for Python”,
Acessado em janeiro de 2016. <http://www pylint org/>.
- [37] “CERN IT Security Recomended Tools”,
Acessado em janeiro de 2016. https://security web cern ch/security/recommendations/en/code_tools shtml.
- [38] BESSEY, A., BLOCK, K., CHELF, B., et al., “A Few Billion Lines of Code Later: Using Static Analysis to Find Bugs in the Real World”, *Commun. ACM*, v. 53, n. 2, pp. 66–75, Feb. 2010.
- [39] BRUN, R., RADEMAKERS, F., “ROOT-an object oriented data analysis framework”. In: *World Scientific Publishing*, 2005.
- [40] “Coverity efects at CERN”,
Acessado em janeiro de 2016. <http://www coverity com/press-releases/cern-chooses-coverity-to-ensure-accuracy-of-large-hadron-c>
- [41] HECKMAN, S., WILLIAMS, L., “A Systematic Literature Review of Actionable Alert Identification Techniques for Automated Static Code Analysis”, *Inf. Softw. Technol.*, v. 53, n. 4, pp. 363–387, April 2011.
- [42] HECKMAN, S., WILLIAMS, L., “A measurement framework of alert characteristics for false positive mitigation models”, *North Carolina State University TR-2008- 23*, October 2008.
- [43] FAIRLEY, R., “Tutorial: Static Analysis and Dynamic Testing of Computer Software”, *Computer*, v. 11, n. 4, pp. 14–23, April 1978.

- [44] TISCHLER, R., SCHAUFLER, R., PAYNE, C., “Static Analysis of Programs As an Aid to Debugging”, *SIGSOFT Softw. Eng. Notes*, v. 8, n. 4, pp. 155–158, March 1983.
- [45] YUKSEL, U., SÄZER, H., “Automated Classification of Static Code Analysis Alerts: A Case Study.” In: *ICSM*, pp. 532–535, IEEE Computer Society, 2013.
- [46] HECKMAN, S., WILLIAMS, L., “A Model Building Process for Identifying Actionable Static Analysis Alerts”. In: *Software Testing Verification and Validation, 2009. ICST '09. International Conference on*, pp. 161–170, April 2009.
- [47] HECKMAN, S., WILLIAMS, L., “On Establishing a Benchmark for Evaluating Static Analysis Alert Prioritization and Classification Techniques”. In: *Proceedings of the Second ACM-IEEE International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement, ESEM '08*, pp. 41–50, ACM: New York, NY, USA, 2008.
- [48] AGGARWAL, A., JALOTE, P., “Integrating Static and Dynamic Analysis for Detecting Vulnerabilities”. In: *Proceedings of the 30th Annual International Computer Software and Applications Conference - Volume 01, COMPSAC '06*, pp. 343–350, IEEE Computer Society: Washington, DC, USA, 2006.
- [49] BOOGERD, C., MOONEN, L., “Prioritizing Software Inspection Results using Static Profiling”. In: *Source Code Analysis and Manipulation, 2006. SCAM '06. Sixth IEEE International Workshop on*, pp. 149–160, Sept 2006.
- [50] KIM, S., ERNST, M., “Prioritizing Warning Categories by Analyzing Software History”. In: *Mining Software Repositories, 2007. ICSE Workshops MSR '07. Fourth International Workshop on*, pp. 27–27, May 2007.
- [51] KIM, S., ERNST, M. D., “Which Warnings Should I Fix First?” In: *Proceedings of the the 6th Joint Meeting of the European Software Engineering Conference and the ACM SIGSOFT Symposium on The Foundations of Software Engineering, ESEC-FSE '07*, pp. 45–54, ACM: New York, NY, USA, 2007.
- [52] KREMENEK, T., ENGLER, D., “Z-ranking: Using Statistical Analysis to Counter the Impact of Static Analysis Approximations”. In: *Procee-*

- dings of the 10th International Conference on Static Analysis, SAS'03*, pp. 295–315, Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg, 2003.
- [53] HALSTEAD, M. H., *Elements of Software Science (Operating and Programming Systems Series)*. Elsevier Science Inc.: New York, NY, USA, 1977.
- [54] MACCABE, T., MCCABE, ASSOCIATES, et al., *Structured testing. Tutorial Texts Series*, IEEE Computer Society Press, 1983.
- [55] JONES, J., “Abstract Syntax Tree Implementation Idioms”. In: *Proceedings of the 10th Conference on Pattern Languages of Programs (PLoP2003)*, 2003.
- [56] OMAN, P., HAGEMEISTER, J., “Metrics for assessing a software system’s maintainability”. In: *Software Maintenance, 1992. Proceedings., Conference on*, pp. 337–344, Nov 1992.
- [57] SENI, G., ELDER, J., *Ensemble Methods in Data Mining: Improving Accuracy Through Combining Predictions*. Morgan and Claypool Publishers, 2010.
- [58] DIETTERICH, T. G., “Ensemble Methods in Machine Learning”. In: *Proceedings of the First International Workshop on Multiple Classifier Systems, MCS '00*, pp. 1–15, Springer-Verlag: London, UK, UK, 2000.
- [59] BREIMAN, L., “Random Forests”, *Mach. Learn.*, v. 45, n. 1, pp. 5–32, Oct. 2001.
- [60] ROE, B. P., YANG, H.-J., ZHU, J., et al., “Boosted decision trees as an alternative to artificial neural networks for particle identification ”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, v. 543, n. 2 - 3, pp. 577 – 584, 2005.
- [61] FREUND, Y., SCHAPIRE, R. E., “A Decision-Theoretic Generalization of On-Line Learning and an Application to Boosting”, *J. Comput. Syst. Sci.*, v. 55, n. 1, pp. 119–139, Aug. 1997.