



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

Aprimorando a detecção de vulnerabilidades em APIs criptográficas Java: uma abordagem qualitativa integrando CogniCrypt, CryptoGuard e LibScout

Guilherme Andreúce S. Monteiro

Monografia apresentada como requisito parcial
para conclusão do Bacharelado em Ciência da Computação

Orientador

Prof. Dr. Rodrigo Bonifacio de Almeida

Brasília
2023



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

Aprimorando a detecção de vulnerabilidades em APIs criptográficas Java: uma abordagem qualitativa integrando CogniCrypt, CryptoGuard e LibScout

Guilherme Andreúce S. Monteiro

Monografia apresentada como requisito parcial
para conclusão do Bacharelado em Ciência da Computação

Prof. Dr. Rodrigo Bonifacio de Almeida (Orientador)
CIC/UnB

Prof. Dr. Donald Knuth Dr. Leslie Lamport
Stanford University Microsoft Research

Prof. Dr. Marcelo Grandi Mandelli
Coordenador do Bacharelado em Ciência da Computação

Brasília, 19 de setembro de 2023

Dedicatória

Eu dedico este trabalho a minha esposa, Nicole Borba Monteiro, que me apoiou e incentivou durante todo o processo de desenvolvimento deste trabalho. Dedico também aos meus pais, Karla e Marlos Monteiro, que sempre me apoiaram e me incentivaram a estudar mesmo sem entender muito bem o que eu estava fazendo. Também aos meus amigos que me ajudaram a manter a sanidade durante o processo de desenvolvimento deste trabalho e que sempre me incentivaram a nunca desistir.

Agradecimentos

Agradeço ao Prof. Dr. Rodrigo Bonifacio de Almeida pela persistência e paciência em me orientar durante o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também em especial ao Luis Amaral por não só ter me ajudado com tudo o que foi necessário como também por ter me incentivado a continuar quando eu estava prestes a desistir. Agradeço ao Rafael Bressan por ter me ajudado com a união dos resultados dos csvs gerados. Agradeço também ao Bruno Chaves pelas dicas e sugestões que me ajudaram a melhorar o trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), por meio do Acesso ao Portal de Periódicos.

Resumo

Este estudo apresenta uma abordagem inovadora para aprimorar a detecção de vulnerabilidades em APIs criptográficas Java, visando fortalecer a segurança de aplicações baseadas nessa tecnologia. Para isso, integramos as ferramentas CogniCrypt e CryptoGuard com o LibScout, permitindo a identificação precisa da origem de warnings relacionados a bibliotecas externas. Essa abordagem qualitativa representa um avanço significativo na promoção da segurança em aplicações Java, contribuindo para um ecossistema digital mais resiliente e protegido contra potenciais ameaças cibernéticas. Ao incorporar a identificação da origem dos warnings, também possibilitamos sugestões diretas aos desenvolvedores das bibliotecas, otimizando o processo de correção de vulnerabilidades. No entanto, enfrentamos desafios ao analisar código obfuscado e ao utilizar clusters e datasets no LibScout, evidenciando a necessidade de aprimoramentos nessa ferramenta. A integração proposta neste trabalho representa um passo significativo em direção à segurança abrangente de dados sensíveis e sistemas críticos em aplicações Java.

Palavras-chave: CogniCrypt, Eclipse, Segurança do código, Análise

Abstract

This study introduces a innovative approach to enhance the detection of vulnerabilities in Java cryptographic APIs, aiming to strengthen the security of applications built on this technology. By integrating the tools CogniCrypt and CryptoGuard with LibScout, we enable the precise identification of the source of warnings related to external libraries. This qualitative approach represents a significant advancement in promoting security in Java applications, contributing to a more resilient digital ecosystem protected against potential cyber threats. The incorporation of warning source identification also allows for direct suggestions to library developers, streamlining the vulnerability correction process. However, we encountered challenges when analyzing obfuscated code and utilizing clusters and datasets in LibScout, highlighting the need for improvements in this tool. The integration proposed in this work represents a significant step towards comprehensive security for sensitive data and critical systems in Java applications.

Keywords: CogniCrypt, Eclipse, Code Security, Analysis

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Introdução	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Justificativa	3
2	Trabalhos Correlatos e Revisão de Literatura	4
2.1	Trabalhos Correlatos e Revisão de Literatura	4
2.1.1	Criptografia	4
2.1.2	Análise dinâmica de APIs criptográficas	5
2.1.3	Deteção de vulnerabilidades em APIs criptográficas Java	5
2.1.4	Deteção de bibliotecas externas em aplicações Android	6
2.1.5	LibScout	7
2.1.6	Aplicativos obfuscados	8
2.1.7	O que é a ferramenta CogniCrypt?	8
2.1.8	O que é a linguagem CrySL?	9
2.1.9	O que é a ferramenta CryptoGuard?	9
3	Metodologia	10
3.1	Hipótese de Trabalho	10
3.2	Metodologia	10
4	Resultados	15
4.1	Percepção dos desenvolvedores em relação as vulnerabilidade em aplicativos open source	15
4.2	Análise quantitativa em aplicativos android	16
4.2.1	Análise quantitativa da integração do Cryptoguard e do Cognicrypt com o LibScout	17
4.2.2	Resultados CogniCrypt x CryptoGuard	21

5 Conclusão	27
5.1 Conclusão	27
Referências	29

Lista de Figuras

3.1 Metodologia adotada no artigo 'Perceptions of Software Practitioners Regarding Crypto-API Misuses and Vulnerabilities'	11
3.2 Metodologia adotada neste trabalho'	11
3.3 'Exemplo de uma Gist'	13
4.1 Quantidade média de alertas por aplicativo	17
4.2 Comparação total entre as ferramentas CogniCrypt e CryptoGuard	20
4.3 Comparação proporcional total entre as ferramentas CogniCrypt e CryptoGuard	21
4.4 Comparação entre as ferramentas CogniCrypt e CryptoGuard na categoria Connectivity	23
4.5 Comparação entre as ferramentas CogniCrypt e CryptoGuard na categoria Finances	24
4.6 Comparação entre as ferramentas CogniCrypt e CryptoGuard na categoria SMS	25
4.7 Comparação entre as ferramentas CogniCrypt e CryptoGuard na categoria System	26

Lista de Tabelas

4.1	Aplicativos por categoria sem warning das ferramentas CogniCrypt e CryptoGuard	16
4.2	Warnings encontrados nas ferramentas CogniCrypt e CryptoGuard	16
4.3	Resultados da integração do CogniCrypt com o LibScout na categoria Connectivity	18
4.4	Resultados da integração do CogniCrypt com o LibScout na categoria Finances	18
4.5	Resultados da integração do CogniCrypt com o LibScout na categoria SMS	18
4.6	Resultados da integração do CogniCrypt com o LibScout na categoria System	18
4.7	Resultados da integração do CryptoGuard com o LibScout na categoria Connectivity	19
4.8	Resultados da integração do CryptoGuard com o LibScout na categoria Finances	19
4.9	Resultados da integração do CryptoGuard com o LibScout na categoria SMS	19
4.10	Resultados da integração do CryptoGuard com o LibScout na categoria System	19
4.11	Resultados da integração do CryptoGuard com o LibScout na categoria System	20

Capítulo 1

Introdução

1.1 Introdução

A criptografia, uma disciplina essencial da segurança da informação, é fundamental para proteger sistemas digitais e dados sensíveis de ameaças cibernéticas. [1] Com a complexidade das aplicações aumentando e a variedade de bibliotecas e frameworks disponíveis, o desenvolvimento de ferramentas automatizadas capazes de detectar possíveis falhas e vulnerabilidades nas interfaces de programação de aplicações (APIs) criptográficas torna-se crucial. [2]

O surgimento da linguagem CrySL permitiu a definição precisa de regras para o uso seguro de APIs criptográficas em código Java. [3] A linguagem permitiu a criação de padrões mais rigorosos para a implementação de métodos de criptografia seguros. No entanto, há um grande número de investigações sobre as dúvidas sobre a eficácia das ferramentas atuais e a precisão de seus alertas.

Neste contexto, o presente estudo empreende uma análise qualitativa abrangente da detecção de vulnerabilidades em APIs criptográficas, valendo-se das ferramentas CogniCrypt [3] e CryptoGuard [4].

Deparamo-nos com a complexidade inerente à análise de código obfuscado durante a realização deste estudo, o que reforçou o valor de considerar uma variedade de contextos de implementação ao avaliar a eficácia das ferramentas de detecção de vulnerabilidades. [5]

Adicionalmente, foi observado que as ferramentas CogniCrypt e CryptoGuard, embora extremamente importantes em termos de sua capacidade de detectar possíveis vulnerabilidades, não são capazes de identificar de onde surgem os alertas, sejam eles originários de bibliotecas nativas ou externas. [6] Tal limitação poderia potencialmente acarretar em falsos positivos ou negligenciar alertas de importância vital advindos de bibliotecas de fundamento.

Para superar esse desafio, lançamos mão do estudo intitulado "Automated Third-Party Library Detection for Android Applications: Are We There Yet?". [6] A partir dessa fonte, propomos uma solução inovadora ao integrar o resultado do LibScout ao contexto do CryptoGuard e CogniCrypt. Esta abordagem possibilitou não apenas a detecção de potenciais vulnerabilidades, mas também a identificação precisa de correspondências associadas a bibliotecas externas. Desse modo, concebeu-se uma flag adicional, denominada "external_library", destinada a sinalizar a presença de uma biblioteca externa quando uma correspondência era identificada.

Também foi considerado o mapeamento geral das bibliotecas encontradas nos resultados da ferramenta LibScout [7] o que nos possibilitou identificar não só as bibliotecas que definitivamente eram externas como também fazer o casamento das classes apresentadas pelos analisadores estáticos surgindo assim outra flag denominada "possible_external". Esta destinada a sinalizar se a biblioteca continha classes que poderiam ser externas.

No entanto, é essencial mencionar os desafios enfrentados ao usar o LibScout. Por vezes, a ferramenta apresentou limitações ao definir clusters com diferentes graus de granularidade. Como resultado, os resultados podem não incluir bibliotecas conhecidas como não-nativas. Além disso, o conjunto de dados mais recente que está disponível para uso data de julho de 2019, o que pode alterar a extensão das correspondências identificadas.

A inclusão deste recurso não apenas aumentou a precisão da detecção de falhas, mas também abriu novas perspectivas. Agora somos capazes de fornecer diretamente recomendações aos desenvolvedores das bibliotecas em questão, o que permite uma intervenção mais direta e eficaz na resolução de possíveis vulnerabilidades. Antes, os desenvolvedores precisavam se encarregar da tarefa.

Este trabalho representa um avanço significativo na promoção da segurança de aplicações baseadas em Java, com o objetivo de proteger sistemas vitais e dados sensíveis de ameaças cibernéticas. Para contribuir para um ecossistema digital mais resiliente e protegido, as práticas de segurança na implementação de APIs criptográficas serão fortalecidas por meio dessa abordagem qualitativa e da integração de ferramentas de detecção.

1.2 Objetivos

O objetivo inicial deste estudo era fornecer aos desenvolvedores uma forma de identificar vulnerabilidades em APIs criptográficas. No entanto, ao longo do estudo, percebeu-se que a detecção de vulnerabilidades em APIs criptográficas, valendo-se das ferramentas CogniCrypt e CryptoGuard, não era suficiente para identificar a origem dos alertas.

Dessa forma, o objetivo deste estudo foi ampliado para incluir a identificação da origem dos alertas. Esta expansão se revelou crucial, uma vez que a capacidade de precisamente

determinar a origem de um alerta é de extrema importância para os desenvolvedores. Isso possibilita ações direcionadas e específicas para corrigir possíveis vulnerabilidades, economizando tempo e recursos valiosos no processo de desenvolvimento e garantindo a segurança efetiva das aplicações.

Para isso, foi necessário integrar o resultado do LibScout ao contexto do CryptoGuard e CogniCrypt. Esta abordagem possibilitou não apenas a detecção de potenciais vulnerabilidades, mas também a identificação precisa de correspondências associadas a bibliotecas externas, fornecendo uma visão clara da origem dos alertas e permitindo a implementação de soluções de segurança de forma eficiente e focalizada.

1.3 Justificativa

A crescente complexidade das aplicações Java, aliada à importância crítica da segurança da informação, torna imperativo o desenvolvimento de técnicas e ferramentas que auxiliem os desenvolvedores na identificação e correção de potenciais vulnerabilidades em APIs criptográficas. Diversos estudos demonstraram que o uso inadequado dessas APIs é uma das principais fontes de vulnerabilidades em software.

Diante desse cenário, a presente pesquisa se propõe a aprimorar a detecção de vulnerabilidades em APIs criptográficas, proporcionando aos desenvolvedores uma solução mais abrangente e eficaz para garantir a segurança das aplicações Java. A integração dos resultados do LibScout às ferramentas CryptoGuard e CogniCrypt representa um avanço significativo, pois não apenas identifica potenciais vulnerabilidades, mas também localiza a origem desses alertas, permitindo uma intervenção mais precisa e efetiva por parte dos desenvolvedores.

Portanto, este estudo se justifica pela necessidade premente de fortalecer a segurança das aplicações Java e pela contribuição inovadora que a abordagem proposta representa para esse fim.

Capítulo 2

Trabalhos Correlatos e Revisão de Literatura

2.1 Trabalhos Correlatos e Revisão de Literatura

2.1.1 Criptografia

O conceito do dicionário de criptografia é a prática de proteger informações e comunicações por meio do uso de códigos, hashes, assinaturas, para que apenas aqueles para quem as informações são destinadas possam lê-las e processá-las. No contexto de ciência da computação, de acordo com Kathleen Richards [1] a criptografia se refere a técnicas seguras de informações e comunicações derivadas de conceitos matemáticos e de um conjunto de cálculos baseados em regras chamados algoritmos, para transformar mensagens de maneiras difíceis de decifrar. A criptografia moderna preocupa-se com quatro objetivos principais: confidencialidade, integridade, não repúdio e autenticação.

- confidencialidade. A informação não pode ser entendida por ninguém além de quem a mensagem foi destinada.
- Integridade. A informação não pode ser alterada de forma alguma entre o remetente e o destinatário sem que isso seja detectado.
- Não Repudição. O remetente não pode negar o envio da informação.
- Autenticação. O remetente e o destinatário devem poder confirmar a identidade de cada um.

Existem diversos algoritmos de criptografia, dentre eles podemos citar o Advanced Encryption Standard (AES), o RSA, o Elliptic Curve Digital Signature Algorithm (ECDSA) e o Digital Signature Algorithm (DSA) [1].

Apesar da importância da criptografia para a segurança dos sistemas, muitos desenvolvedores se deparam com desafios significativos ao tentar implementá-la corretamente. Sem o conhecimento especializado em criptografia, é possível utilizar erroneamente algoritmos e técnicas criptográficas inadequadas. [8] [2] Isso pode resultar em vulnerabilidades que comprometem a segurança e a privacidade dos dados dos usuários. Portanto, é essencial contar com ferramentas que possam orientar os desenvolvedores na aplicação correta das práticas criptográficas, reduzindo assim os riscos associados à implementação inadequada de medidas de segurança em software.[2]

2.1.2 Análise dinâmica de APIs criptográficas

O estudo realizado por Torres et al. [9] fornece uma importante investigação comparativa de métodos de detecção de uso inadequado de APIs criptográficas em projetos Java.

A pesquisa conduzida oferece uma análise detalhada das técnicas empregadas, incluindo a abordagem de Verificação em Tempo de Execução (Runtime Verification, ou RV-Sec), juntamente com notáveis analisadores estáticos como CogniCrypt e CryptoGuard, além da ferramenta CryLogger.

Este estudo desempenha um papel complementar para a nossa própria investigação. Ele não apenas fornece uma visão sobre as técnicas de detecção de vulnerabilidades em APIs criptográficas, mas também motiva a explorar uma perspectiva complementar em relação as ferramentas de análises estáticas.

2.1.3 Detecção de vulnerabilidades em APIs criptográficas Java

O artigo intitulado "Automatic Detection of Java Cryptographic API Misuses: Are We There Yet?"[2] aborda os desafios enfrentados pelos desenvolvedores ao trabalhar com APIs criptográficas Java.

Na análise feita por Zhang, é destacado questões como a complexidade das APIs, a falta de documentação adequada e a falta de treinamento em segurança cibernética por parte dos desenvolvedores [2] como as principais causas de vulnerabilidades nos códigos.

Ele ainda destaca que muitos desenvolvedores podem não possuir o treinamento em cibersegurança necessário para compreender plenamente as implicações de segurança ao utilizar as opções de codificação dentro das APIs criptográficas.

Nos exemplos citados no artigo temos os desenvolvedores não estarem completamente cientes dos valores adequados para serem utilizados como parâmetros de funções criptográficas, das sequências de chamadas corretas ou da lógica de substituição, o que pode resultar na implementação insegura de funcionalidades de segurança [2], a prática de

copiar e colar trechos de código de fontes online, como o StackOverflow sem ter total entendimento do que está sendo copiado.

O estudo ainda foi além e tentou identificar a percepção dos desenvolvedores em relação a vulnerabilidades em seus códigos.

Houveram visões divergentes em relação às ferramentas existentes para detectar usos incorretos de APIs.

Dos feedbacks recebidos, a maioria dos desenvolvedores rejeitou as vulnerabilidades relatadas, indicando que não as consideravam válidas ou relevantes. Menos desenvolvedores demonstraram disposição para abordar os problemas reportados e fazer as correções necessárias. Ainda menos desenvolvedores efetivamente substituíram os usos incorretos de APIs com base nas orientações fornecidas pelas ferramentas [2].

Os fatores que contribuíram para a relutância dos desenvolvedores em lidar com os problemas reportados incluem:

As sugestões de correção fornecidas pelas ferramentas muitas vezes eram vagas e incompletas, tornando difícil para os desenvolvedores compreender como corrigir os usos incorretos de forma eficaz.

Os desenvolvedores expressaram a necessidade de evidências de exploração de segurança que pudessem ser habilitadas pelas vulnerabilidades relatadas. Eles queriam compreender o impacto potencial e a gravidade dos problemas antes de investir tempo em corrigi-los.

Por fim, alguns dos usos incorretos detectados foram encontrados em código de teste ou em contextos de programa que não eram considerados relevantes para a segurança. Os desenvolvedores acreditavam que esses problemas não teriam consequências de segurança, levando-os a ignorá-los ou descartá-los.

No geral, o estudo revelou uma lacuna significativa entre as ferramentas existentes e as expectativas dos desenvolvedores. Os relatórios gerados pelas ferramentas não alteraram efetivamente as práticas de codificação dos desenvolvedores, e estes tinham preocupações sobre as capacidades das ferramentas, a correção das correções sugeridas e a exploração dos problemas relatados.

Assim, nosso estudo se fundamenta na análise de Zhang, e visa compreender se as vulnerabilidades identificadas pelas ferramentas CryptoGuard e CogniCrypt têm sua origem associada a bibliotecas de caráter nativo ou externo.

2.1.4 Detecção de bibliotecas externas em aplicações Android

Em outro artigo do Zhang, é realizado um estudo com foco na detecção de bibliotecas externas em aplicações android. [5] Esse estudo é importante para o nosso trabalho pois ele aborda a detecção de bibliotecas externas em aplicações Android, e a partir dele

foi possível identificar a ferramenta LibScout, que será utilizada para a identificação de bibliotecas externas em aplicações Android.

Durante o artigo é destacado que muitas vezes a introdução de bibliotecas de terceiros podem resultar em introdução de vulnerabilidades das quais o desenvolvedor nem está ciente.

O estudo foi realizado com várias ferramentas para detectar bibliotecas de terceiros (TPLs) em aplicativos Android, temos:

- LibID, que utiliza análise estática e dinâmica para identificar TPLs.
- LibPecker concentra-se na detecção de TPLs ofuscadas por diferentes técnicas de ofuscação de código.
- ORLIS que emprega uma combinação de análise estática e dinâmica, fornecendo análise de vulnerabilidades para as TPLs identificadas.
- LibRadar que utiliza análise baseada em API e é conhecido por sua rápida detecção.
- LibD2, semelhante ao LibID e ORLIS, usa análise estática e dinâmica, além de fornecer análise de vulnerabilidades para as TPLs detectadas.

Os programas LibID, LibRadar, LibScout, LibPecker e ORLIS foram avaliados em quatro categorias: eficiência, escalabilidade, resistência à ofuscação e facilidade de uso.

O LibScout se destacou na eficiência, identificando 49 bibliotecas de terceiros com uma precisão de 97%. Em escalabilidade, o LibRadar foi o mais eficaz, capaz de analisar cada aplicação em cerca de 5 segundos. No quesito resistência à ofuscação, o LibPecker mostrou-se o mais eficaz. Quanto à facilidade de uso, tanto o LibScout quanto o LibRadar superaram os concorrentes [5].

Devido a eficiência e escalabilidade, inicialmente optamos seguir com o LibScout e com o LibRadar. As outras ferramentas tem tempo de execução muito grande para uma precisão não tão alta.

Os resultados do LibRadar e do LibScout para o piloto não só não foram semelhantes como o LibScout identificou muito mais TPLs do que o LibRadar. Por conta disso, optamos por seguir com o LibScout.

2.1.5 LibScout

A ferramenta LibScout é resultado de um projeto de pesquisa cujo objetivo principal é analisar quais são as bibliotecas externas e quais são bibliotecas nativas em aplicativos Android.

A ferramenta permite analisar chamadas de API de aplicativos Android diretamente do bytecode java.

A ferramenta coleta informações detalhadas sobre bibliotecas implantadas, incluindo nomes e definições, e fornece uma visão abrangente do ecossistema de bibliotecas de cada aplicativo analisado. [7]

Assim, para o estudo desse artigo, a comparação dos resultados das ferramentas CryptoGuard e CogniCrypt aos resultados gerados pelo LibScout visa solucionar o problema de identificar possíveis vulnerabilidades relacionadas ao uso de bibliotecas de terceiros.

2.1.6 Aplicativos obfuscados

Uma dificuldade significativa na localização e extração de informações sobre bibliotecas de terceiros é a análise de aplicativos obfuscados. O uso comum da técnica de ofuscação de código torna a compreensão e análise do código-fonte mais difíceis, tornando a localização de bibliotecas externas ainda mais complicada. [5]

O LibScout é excepcionalmente resistente a aplicativos obfuscados, porém, o CryptoGuard e o CogniCrypt não. Embora essas ferramentas mais recentes detectem problemas e erros de segurança com sucesso, elas têm dificuldade em encontrar os nomes originais das bibliotecas e classes que são usadas. O processo de correlacionar os resultados e combinar os scripts de identificação de bibliotecas externas é mais difícil devido a essa restrição.

O problema acima é um dos motivos dos quais os aplicativos utilizados para montar os testes do estudo não serem obfuscados.

2.1.7 O que é a ferramenta CogniCrypt?

O CogniCrypt, desenvolvido no centro de pesquisa CROSSING da Technische Universität Darmstadt, é uma ferramenta projetada para auxiliar desenvolvedores na identificação e correção de usos inseguros de bibliotecas criptográficas em software.

Estudos recentes têm apontado que muitos aplicativos que empregam procedimentos criptográficos o fazem de maneira inadequada, o que destaca a relevância do CogniCrypt [3].

Essa ferramenta integra-se ao ambiente de desenvolvimento Eclipse e oferece dois principais componentes. Primeiramente, um assistente de geração de código que auxilia os desenvolvedores na produção de código seguro para tarefas criptográficas comuns. Além disso, realiza uma análise estática contínua do código do desenvolvedor, notificando sobre possíveis usos incorretos de APIs criptográficas.

O CogniCrypt pode oferecer uma abordagem abrangente para abordar a identificação de vulnerabilidades no código por meio de dois recursos fundamentais: a geração de código e a aplicação de análises estáticas [3].

Ao integrarmos o CogniCrypt em nossa abordagem, complementando-o com outras ferramentas como o CryptoGuard e o LibScout, queremos fornecer aos desenvolvedores uma estratégia poderosa e abrangente para detectar e corrigir vulnerabilidades em APIs criptográficas Java, seja ela de código nativo ou externo. Isso pode contribuir significativamente para a segurança e integridade dos sistemas desenvolvidos.

2.1.8 O que é a linguagem CrySL?

A linguagem de especificação criptográfica, ou CrySL, é um componente essencial do ecossistema do CogniCrypt. Ele foi desenvolvido para especificar boas práticas para o uso seguro de APIs criptográficas em Java. A CrySL, que foi desenvolvida como parte integrante do CogniCrypt, permite que os desenvolvedores expressem as regras de segurança de forma simples e fácil de entender, o que facilita a identificação de possíveis vulnerabilidades em códigos que envolvem operações criptográficas. [3]

2.1.9 O que é a ferramenta CryptoGuard?

CRYPTOGUARD é uma ferramenta de verificação de código estático projetada para detectar usos incorretos de APIs criptográficas e SSL/TLS em projetos Java de grande porte.

Seu propósito é auxiliar os desenvolvedores na identificação e correção de vulnerabilidades relacionadas a algoritmos criptográficos, exposição de segredos, geração previsível de números aleatórios e verificações de certificados vulneráveis. [4]

O CRYPTOGUARD alcança isso por meio da implementação de um conjunto de novos algoritmos de análise que realizam uma análise estática do código-fonte.

Ele proporciona detecção de alta precisão de vulnerabilidades criptográficas e oferece insights de segurança aos desenvolvedores. [4]

O CRYPTOGUARD utiliza algoritmos especializados de fatiamento de programa para sua análise estática. Esses algoritmos de fatiamento são implementados utilizando técnicas de análise de fluxo de dados sensíveis a fluxo, contexto e campo. Os algoritmos de fatiamento são projetados para identificar o conjunto de instruções que influenciam ou são influenciadas por uma variável de programa. [4]

Resumindo, o Cryptoguard é uma ferramenta, assim como o CogniCrypt, para detectar vulnerabilidades criptográficas em projetos Java.

Capítulo 3

Metodologia

3.1 Hipótese de Trabalho

Ao integrar os resultados do LibScout ao contexto das ferramentas CryptoGuard e CogniCrypt, será possível não apenas detectar potenciais vulnerabilidades em APIs criptográficas, mas também identificar com precisão as correspondências associadas a bibliotecas externas, proporcionando uma abordagem mais abrangente e eficaz para a segurança de aplicações Java que utilizam operações criptográficas.

3.2 Metodologia

A metodologia abordada neste trabalho serve como um instrumento complementar às metodologias e mecanismos descritas e abordadas no artigo 'Perceptions of Software Practitioners Regarding Crypto-API Misuses and Vulnerabilities'. [6] O trabalho realizado [6] apresenta um estudo macro em relação à percepção das vulnerabilidades dos códigos dos desenvolvedores.

A imagem acima descreve a metodologia utilizada. [6] A metodologia abordada neste trabalho entra na etapa de 'Análise de Dados' em específico 'Análise externa / nativa', onde é feita a integração dos resultados obtidos pelo LibScout com os contextos fornecidos pelo CryptoGuard e CogniCrypt. Essa integração tenta proporcionar uma visão mais minuciosa e contextualizada de onde as vulnerabilidades identificadas se encontram. Este trabalho propõe a seguinte integração:

- Coleta de Dados A metodologia adotada para a constituição do conjunto de dados envolveu uma cuidadosa seleção de aplicativos Java provenientes do renomado repositório F-Droid. [6] Este último se destaca como um catálogo de aplicativos de código aberto e livre (FOSS), especialmente concebidos para a plataforma Android.

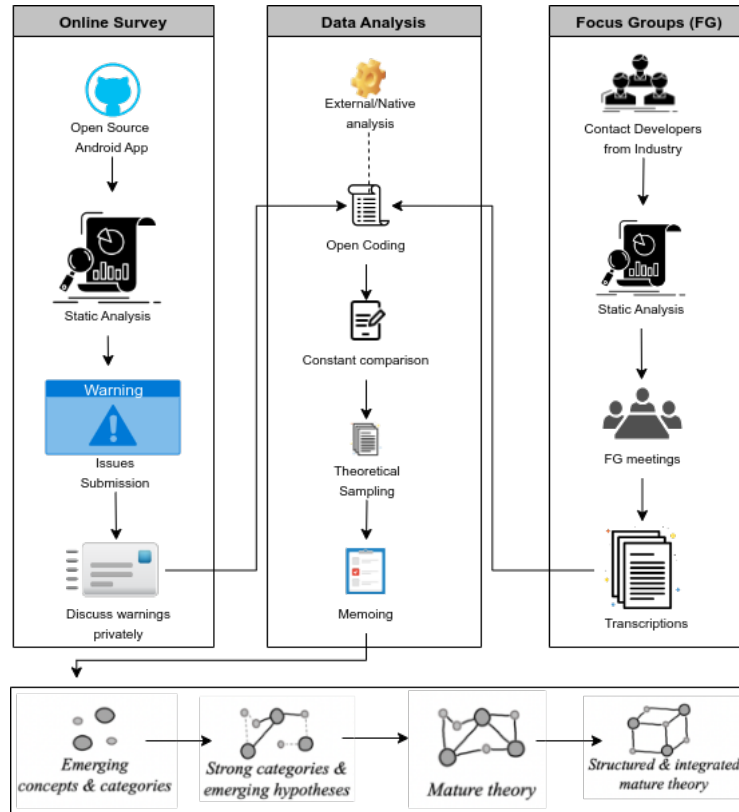


Figura 3.1: Metodologia adotada no artigo 'Perceptions of Software Practitioners Regarding Crypto-API Misuses and Vulnerabilities'

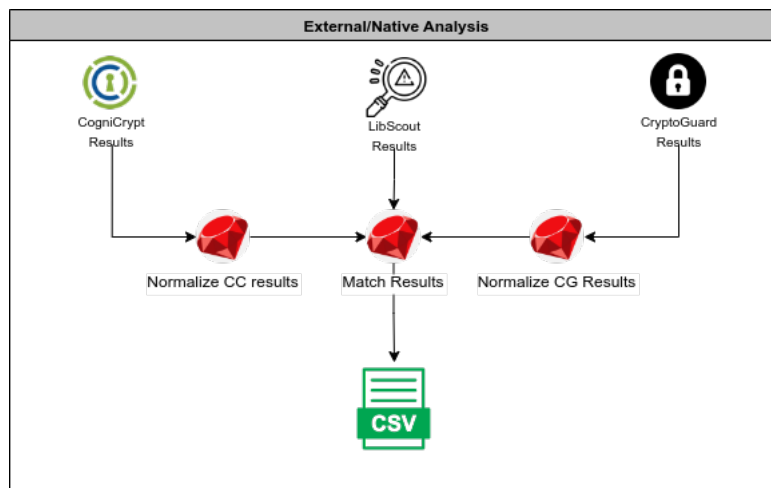


Figura 3.2: Metodologia adotada neste trabalho'

Nesse processo, buscou-se uma representativa diversidade de categorias de aplicativos, abrangendo áreas vitais como conectividade, finanças, segurança, mensagens de texto (SMS) e funcionalidades de sistema. Tal abordagem foi implementada com o intuito de assegurar uma abrangência abarcadora de contextos e finalidades, enriquecendo assim a robustez e representatividade do conjunto de dados analisado.

- **Análise Estática**

A etapa subsequente consistiu na aplicação das ferramentas CryptoGuard e CogniCrypt para conduzir uma análise estática detalhada do código fonte dos aplicativos selecionados. Essa abordagem permitiu a identificação minuciosa de possíveis vulnerabilidades relacionadas às APIs criptográficas empregadas nos aplicativos avaliados. O uso dessas ferramentas especializadas proporcionou uma avaliação precisa e abrangente das práticas de segurança adotadas, visando aprimorar a integridade e robustez dos aplicativos em questão.

- **Identificar a percepção de vulnerabilidade dos desenvolvedores**

Após a conclusão da análise estática, foi possível identificar um conjunto de vulnerabilidades que não foram reconhecidas pelos desenvolvedores, bem como aquelas que foram identificadas, porém não receberam intervenção corretiva. Para facilitar a comunicação e o entendimento das questões de segurança identificadas, procedeu-se à criação de GISTS individuais para cada vulnerabilidade. [6] Um GIST é um recurso que permite compartilhar trechos de código, arquivos inteiros ou até mesmo aplicações, e também possibilita a preservação e compartilhamento de saída de console ao executar, depurar ou testar o código. Cada GIST representa um repositório que pode ser clonado ou bifurcado por outras pessoas, promovendo assim a colaboração e a discussão ativa em busca do aprimoramento da segurança nos aplicativos avaliados.

- **Analisar origem das vulnerabilidades**

A etapa seguinte consistiu na análise da origem das vulnerabilidades identificadas. Para realizar essa análise, empregou-se a ferramenta LibScout, a qual desempenhou um papel crucial ao extrair informações detalhadas sobre as APIs criptográficas utilizadas nos aplicativos, permitindo, assim, a identificação de bibliotecas externas empregadas. A utilização do LibScout proporcionou um panorama abrangente das dependências externas dos aplicativos, fornecendo uma visão clara das fontes potenciais de vulnerabilidades no código. Esta abordagem foi essencial para direcionar os esforços na mitigação das ameaças identificadas e fortalecer a segurança das aplicações avaliadas.

A princípio, considerou-se a utilização do LibRadar devido à sua reputação pela rapidez de execução. Contudo, logo se constatou que a ferramenta estava baseada em dados disponibilizados até 2016, o que não condizia com nossa necessidade de informações atualizadas e abrangentes sobre as bibliotecas utilizadas nos aplicativos. Diante dessa constatação, optou-se por descartar o uso do LibRadar e buscar uma alternativa mais alinhada com os objetivos do estudo.

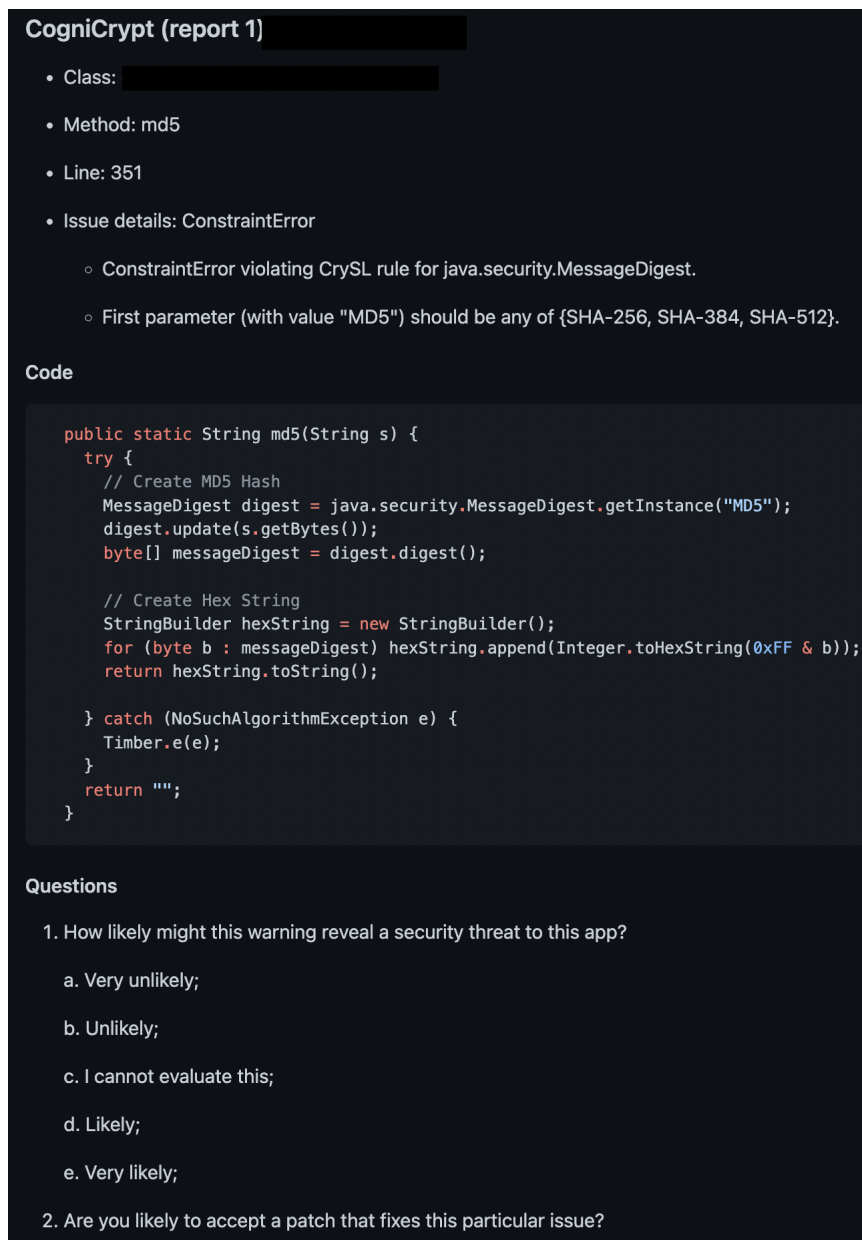


Figura 3.3: 'Exemplo de uma Gist'

- Integração de Resultados

Foi empreendido um esforço no sentido de desenvolver um processo de integração que possibilitasse a unificação dos resultados obtidos por meio do LibScout com os contextos fornecidos pelo CryptoGuard e CogniCrypt. Essa iniciativa tenta criar uma visão mais abrangente e contextualizada das vulnerabilidades identificadas. Em paralelo, foi realizada uma avaliação da eficácia dessa abordagem, no que tange à habilidade de determinar a origem dos alertas gerados pelas mencionadas ferramentas.

Os dados foram classificados em bibliotecas com warnings, bibliotecas com warnings que definitivamente advém de bibliotecas externas, bibliotecas com warnings que possivelmente advém de bibliotecas externas e total de bibliotecas nativas.

- Uma biblioteca com warning é o resultado da análise estática da ferramenta seja ela CogniCrypt ou o CryptoGuard.
- Uma biblioteca com warning que definitivamente advém de bibliotecas externas é o resultado do casamento dos resultados do LibScout com os resultados de uma das duas ferramentas.
- Uma biblioteca com warning que possivelmente advém de bibliotecas externas é o resultado do casamento dos resultados do LibScout com os resultados de uma das duas ferramentas, porém, ao invés de casar com os resultados finais do LibScout, casamos com o caminho das bibliotecas montadas na árvore de bibliotecas
- Total de bibliotecas nativas é o total de bibliotecas menos o total de bibliotecas com warning que definitivamente advém de bibliotecas externas e o total de bibliotecas com warning que possivelmente advém de bibliotecas externas.

Capítulo 4

Resultados

4.1 Percepção dos desenvolvedores em relação as vulnerabilidade em aplicativos open source

O artigo motivador deste trabalho [6] aborda a percepção dos desenvolvedores e profissionais de segurança em relação às vulnerabilidades em aplicativos open source. O estudo não se limitou apenas à análise estática das ferramentas utilizadas, mas também incluiu uma investigação sobre aplicativos Android de código aberto, com o objetivo de obter a opinião dos desenvolvedores envolvidos. [6]

Uma descoberta relevante foi que muitas das questões identificadas pelo CogniCrypt não estavam diretamente relacionadas ao código do aplicativo Android em si, mas sim às bibliotecas de terceiros utilizadas por esses aplicativos. [6] Dentre os projetos de código aberto analisados, aproximadamente 60% apresentaram questões levantadas pelo CogniCrypt que se originavam de códigos de terceiros. Os desenvolvedores abordaram essas preocupações de segurança de maneiras diversas. Alguns optaram por atualizar imediatamente as dependências, enquanto outros confiaram implicitamente nas grandes empresas de tecnologia fornecedoras das bibliotecas e não consideraram os problemas como ameaças reais.

Surpreendentemente, em alguns casos, os desenvolvedores tiveram dificuldades em compreender completamente as questões apresentadas pelo CogniCrypt. Para eles, não estava claro por que determinados trechos de código eram considerados problemas apenas a partir das explicações fornecidas pela ferramenta. Diante disso, os desenvolvedores expressaram o desejo de receber explicações mais detalhadas sobre os problemas identificados, bem como sugestões diretas sobre como corrigi-los. Além disso, alguns sugeriram a categorização dos problemas levantados pelo CogniCrypt com base na origem, indicando se pertencem ao aplicativo digitalizado ou a uma biblioteca de terceiros. Essa observação

proporciona insights valiosos sobre a necessidade de uma comunicação mais eficaz entre as ferramentas de análise e os desenvolvedores, visando uma compreensão mais precisa e eficiente das vulnerabilidades detectadas. [6]

4.2 Análise quantitativa em aplicativos android

Foram analisados 307 aplicativos de 6 diferentes categorias do repositório de aplicativos de código aberto F-Droid. [6] A execução do CogniCrypt reportou 195 Warnings de uso indevido de criptografia enquanto o CryptoGuard reportou 298. [6] A tabela abaixo mostra a quantidade de aplicativos analisados por categoria e a quantidade de Warnings reportados por cada ferramenta. [6]

Categoria	Número de Aplicativos	CogniCrypt	CryptoGuard
Connectivity	58	20	3
Finances	90	25	2
Internet	39	7	0
Security	47	16	1
Sms-Phone	18	10	2
System	55	34	0
Total	307	112	8

Tabela 4.1: Aplicativos por categoria sem warning das ferramentas CogniCrypt e CryptoGuard

Como visto, o número de aplicativos sem warning no cognicrypt é bem maior do que no cryptoguard. A categoria sistema é a que tem a maior diferença entre eles, 34. As categorias conectividade e finanças também tem um número alto de aplicativos sem warnings, 20 e 25, respectivamente. [6]

Apesar disso, o número de warnings fundados pelo CogniCrypt é maior do que no CryptoGuard, descrito na tabela abaixo.

Categoria	CogniCrypt (a)	CryptoGuard (b)	Diferença (a - b)
Connectivity	1768 (16.02%)	1124 (22.64%)	644 (10.61%)
Finances	3087 (27.97%)	1687 (33.98%)	1400 (23.06%)
Internet	3407 (30.87%)	916 (18.45%)	2491 (41.02%)
Security	1780 (16.13%)	553 (11.14%)	1227 (20.21%)
Sms-Phone	428 (3.88%)	171 (3.44%)	257 (4.23%)
System	566 (5.13%)	513 (10.33%)	53 (0.87%)
Total	11 036 (100.00%)	4964 (100.00%)	6072 (100.00%)

Tabela 4.2: Warnings encontrados nas ferramentas CogniCrypt e CryptoGuard

Como podemos observar na tabela acima, o CogniCrypt consegue encontrar 4964 warnings enquanto o Cryptoguard encontrou 11036 warnings. A diferença numérica é

de 6072 (ou 122.32%) de warnings entre as duas ferramentas. A categoria de finanças e internet concentrou 58.8% (6494) dos warnings do CogniCrypt e as categorias de finanças e conectividade concentram 56.6% (2811) dos warnings do CryptoGuard. A maior diferença entre os warnings fundados foi notada nas categorias internet (2491) e finanças (1400), representando 64.1% de diferença. [6]

Considerando os resultados acima, analisamos a quantidade média de warnings por aplicativo. Os resultados são mostrados no gráfico abaixo.

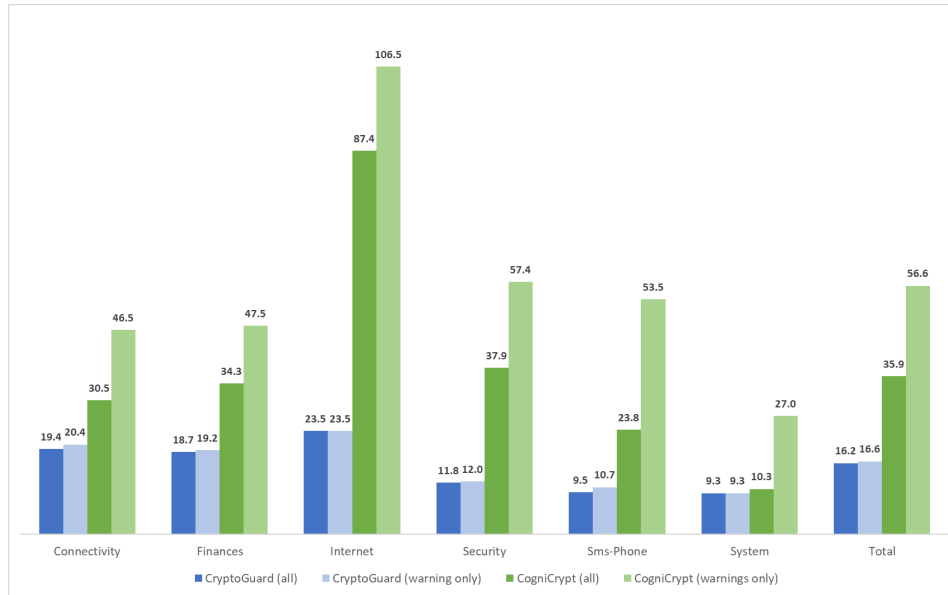


Figura 4.1: Quantidade média de alertas por aplicativo

Como esperado, a média de warnings é maior no CogniCrypt do que no CryptoGuard. A diferença é ainda maior quando desconsideramos os aplicativos sem warnings. A categoria internet tem a maior média de warnings nas duas ferramentas, com um valor maior no CogniCrypt: 106.5 warnings por aplicativo. Em segundo e terceiro lugares temos as categorias segurança e sms-telefone no CogniCrypt e internet e conectividade, considerando a média de warnings fundados pelo CryptoGuard. [6]

4.2.1 Análise quantitativa da integração do Cryptoguard e do Cognicrypt com o LibScout

A fim de facilitar a análise, os aplicativos foram categorizados. Em cada categoria, serão exibidos os resultados relativos ao número de aplicativos com alertas de vulnerabilidade, diferenciando aqueles que são potencialmente externos dos que são definitivamente externos, para cada ferramenta utilizada. As tabelas a seguir apresentam os resultados dessas integrações.

CogniCrypt

CC/Connectivity	Warnings (a)	Possible ext (b)	Definite ext (c)	Native-ext (a-b-c)
Média	21.9	2.3	2.4	17.1
Desvio Padrão	43.8	10.3	6.1	42.8
Variância	1919.8	107.8	38.2	1831.9

Tabela 4.3: Resultados da integração do CogniCrypt com o LibScout na categoria Connectivity

CC/Finances	Warnings (a)	Possible ext (b)	Definite ext (c)	Native-ext (a-b-c)
Média	46.4	2.8	7.5	35.9
Desvio Padrão	132.06	10.8	41.8	126.07
Variância	17 439.9	118.2	1747.7	15 895.3

Tabela 4.4: Resultados da integração do CogniCrypt com o LibScout na categoria Finances

CC/SMS	Warnings (a)	Possible ext (b)	Definite ext (c)	Native-ext (a-b-c)
Média	11.7	2.36	1	8.3
Desvio Padrão	31.67	7.78	3.69	24.1
Variância	1003.03	60.54	12.94	585.4

Tabela 4.5: Resultados da integração do CogniCrypt com o LibScout na categoria SMS

CC/System	Warnings (a)	Possible ext (b)	Definite ext (c)	Native-ext (a-b-c)
Média	10.09	0.93	0.36	8.79
Desvio Padrão	33.01	3.74	1.28	31.82
Variância	1090.2	14.05	1.66	1012.5

Tabela 4.6: Resultados da integração do CogniCrypt com o LibScout na categoria System

Os resultados para a tabela de conectividade (4.3) mostram que em média, por aplicativo, o CogniCrypt encontrou 21.9 warnings de vulnerabilidade. Desses, 2.3 são possivelmente externos e 2.4 são definitivamente externos. A quantidade de warnings nativos é de 17.1. Para finanças (4.4), a média de warnings por aplicativo é de 46.4. Desses, 2.8 são possivelmente externos e 7.5 são definitivamente externos. A quantidade de warnings nativos é de 35.9. Para SMS (4.5), a média de warnings por aplicativo é de 11.7. Desses, 2.36 são possivelmente externos e 1 é definitivamente externo. A quantidade de warnings nativos é de 8.3. E para sistema (4.6), a média de warnings por aplicativo é de 10.09. Desses, 0.93 são possivelmente externos e 0.36 são definitivamente externos. A quantidade de warnings nativos é de 8.79. Em todos os exemplos, o desvio padrão e a variância são altos, indicando que os valores estão bem dispersos. Isso é explicado tanto pelas limitações do LibScout quanto pelas limitações do CogniCrypt. [6] O LibScout

pode não ter mapeado a biblioteca com warning como externa [7] e o CogniCrypt pode ter encontrado warnings em bibliotecas que não foram mapeadas pelo LibScout ou ainda não ter encontrado vulnerabilidade no aplicativo selecionado. [6]

CryptoGuard

CG/Connectivity	Total Libraries	Possible Ext.	Definite Ext.	Native Libraries
Média	15.1	0.73	5.21	9.22
Desvio Padrão	25.62	2.17	9.91	18.7
Variância	656.6	4.71	98.3	352.4

Tabela 4.7: Resultados da integração do CryptoGuard com o LibScout na categoria Connectivity

CG/Finances	Total Libraries	Possible Ext.	Definite Ext.	Native Libraries
Média	10.45	1.33	4.68	4.43
Desvio Padrão	20.71	4.72	10.03	10.05
Variância	429.13	22.2	100.72	101.1

Tabela 4.8: Resultados da integração do CryptoGuard com o LibScout na categoria Finances

CG/SMS	Total Libraries	Possible Ext.	Definite Ext.	Native Libraries
Média	9	0.78	2.73	5.47
Desvio Padrão	18.72	2.09	5.66	16.22
Variância	350.6	4.37	32.08	263.19

Tabela 4.9: Resultados da integração do CryptoGuard com o LibScout na categoria SMS

CG/System	Total Libraries	Possible Ext.	Definite Ext.	Native Libraries
Média	7.53	0.65	2.67	4.2
Desvio Padrão	16.49	2.69	7.07	12
Variância	272.21	7.27	50.07	146.4

Tabela 4.10: Resultados da integração do CryptoGuard com o LibScout na categoria System

Analisando a tabela de conectividade (4.7) observa-se que o CryptoGuard, em média por aplicativo, detectou 15.1 alertas de vulnerabilidade, dos quais 0.73 são potencialmente externos e 5.21 definitivamente externos, com 9.22 alertas nativos. Na categoria de finanças (4.8), a média foi de 10.45 alertas por aplicativo, com 1.33 potencialmente externos e 4.68 definitivamente externos, além de 4.43 nativos. Para SMS, (4.9), a média foi de 9 alertas, com 0.78 potencialmente externos e 2.73 definitivamente externos, e 5.47 nativos. E para sistema (4.10), a média foi de 7.53 alertas, com 0.65 potencialmente externos e 2.67 definitivamente externos, além de 4.2 nativos. Os altos desvios padrão e variância

indicam uma dispersão significativa, influenciada pelas limitações do LibScout e do CryptoGuard. [6] Novamente o LibScout pode não ter mapeado a biblioteca com warning como externa [7] e o CryptoGuard pode ter encontrado warnings em bibliotecas que não foram mapeadas pelo LibScout ou ainda não ter encontrado vulnerabilidade no aplicativo selecionado. [6]

-	CogniCrypt	Cryptoguard
Total Aplicativos	246	253
Total Bibliotecas	6798	2710
Total Bibliotecas Externas	1710	1149
Total Bibliotecas Externas Potenciais	726	245
Total Bibliotecas Nativas	4542	1316

Tabela 4.11: Resultados da integração do CryptoGuard com o LibScout na categoria System

A tabela 4.11 mostra um resumo dos resultados obtidos nas categorias analisadas. O CogniCrypt analisou 246 aplicativos, com 6798 bibliotecas, das quais 1710 são externas, 726 potencialmente externas e 4542 nativas. O CryptoGuard analisou 253 aplicativos, com 2710 bibliotecas, das quais 1149 são externas, 245 potencialmente externas e 1316 nativas.

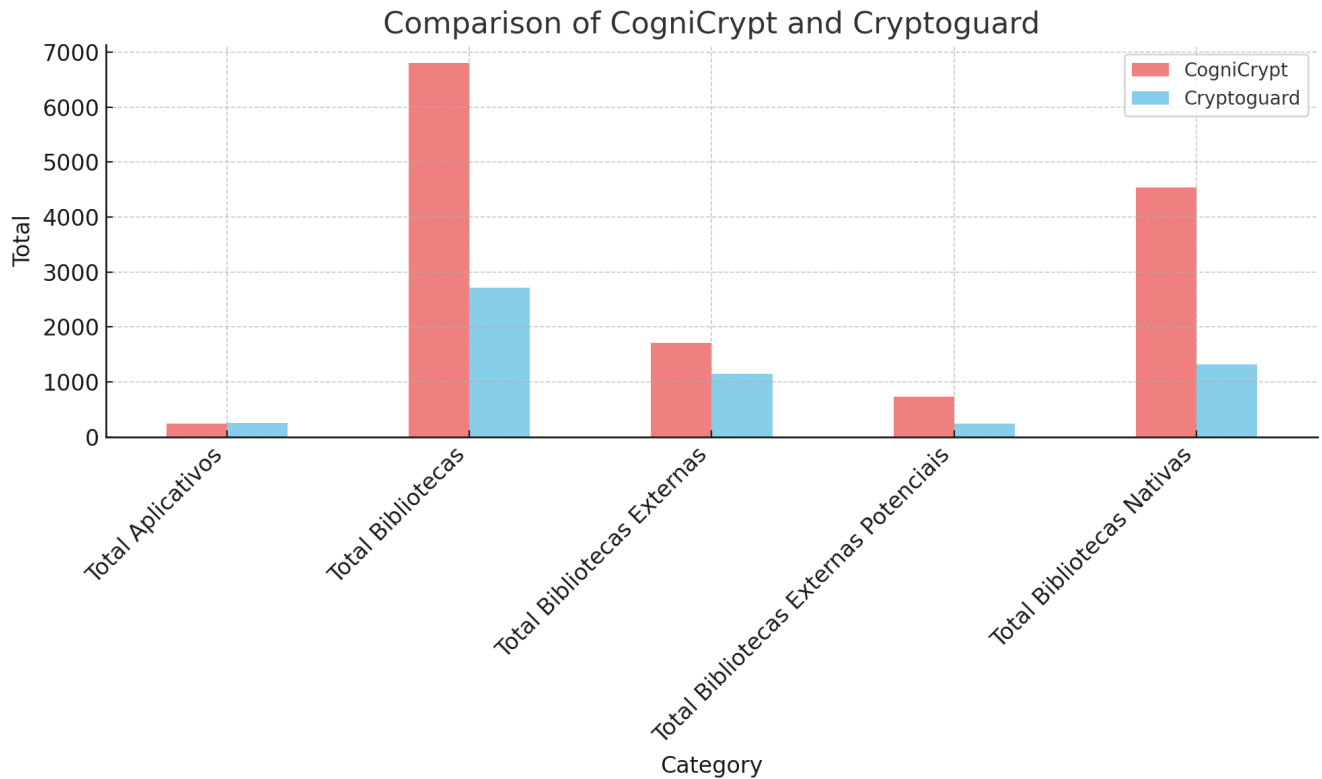


Figura 4.2: Comparação total entre as ferramentas CogniCrypt e Cryptoguard

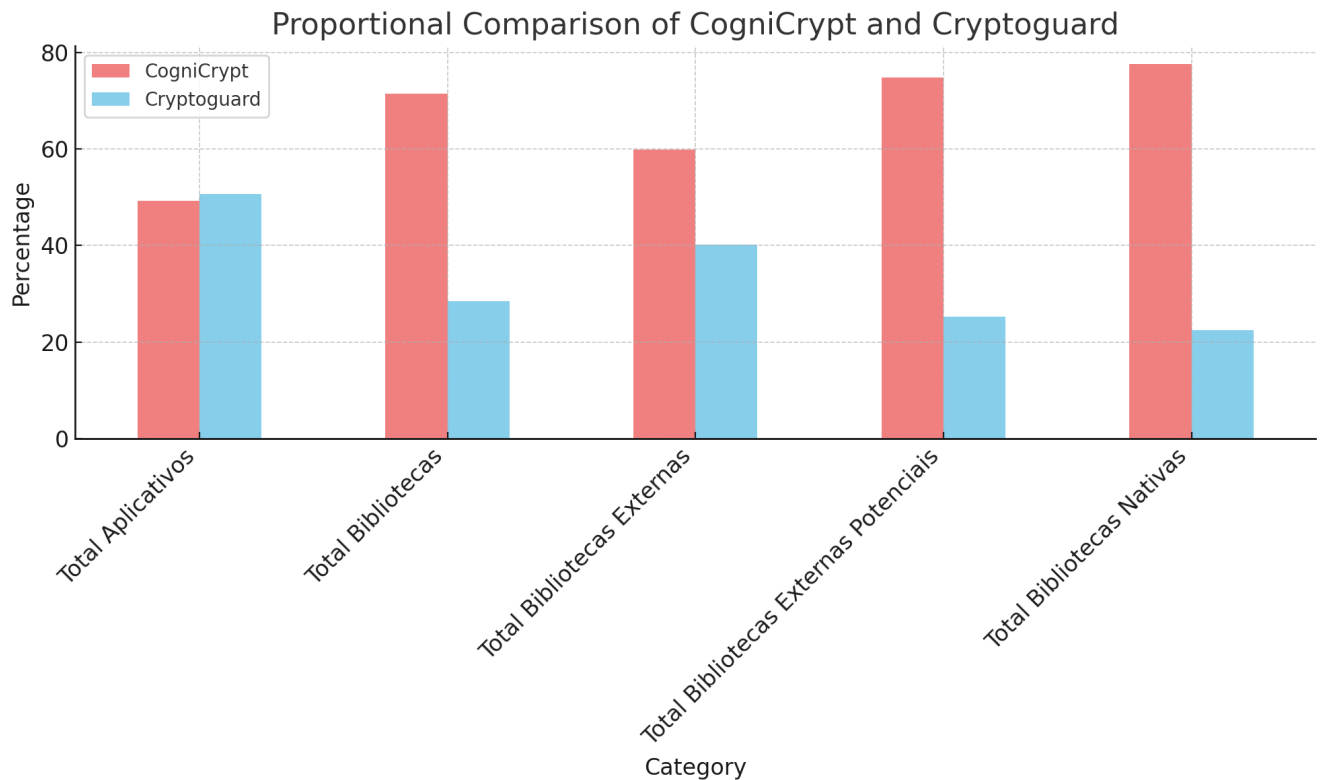


Figura 4.3: Comparação proporcional total entre as ferramentas CogniCrypt e CryptoGuard

Os resultados para a ferramenta CogniCrypt se destacaram em relação aos resultados para o CryptoGuard.

4.2.2 Resultados CogniCrypt x CryptoGuard

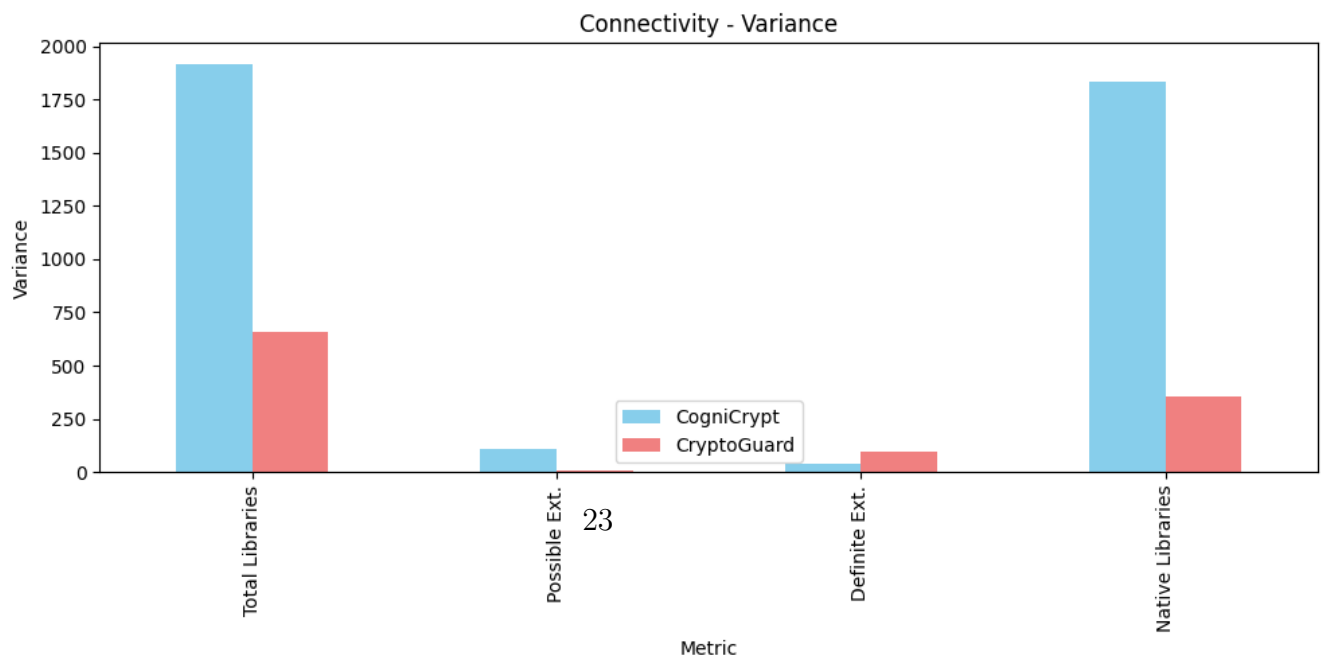
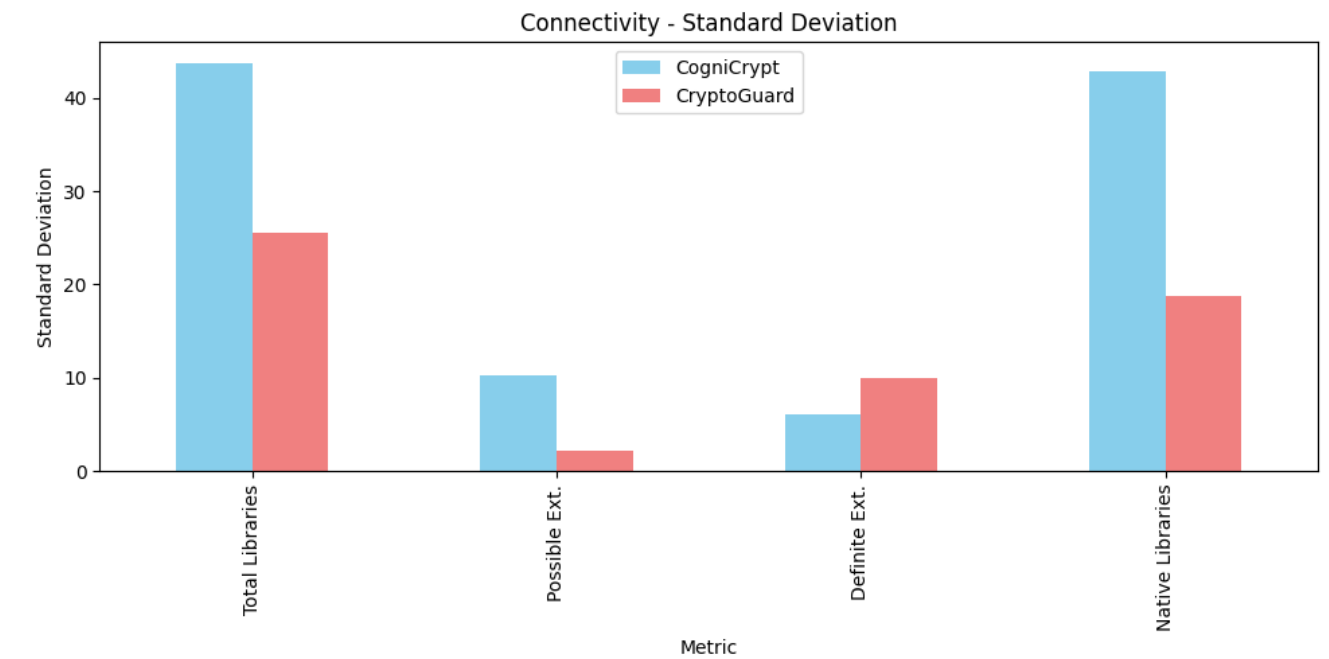
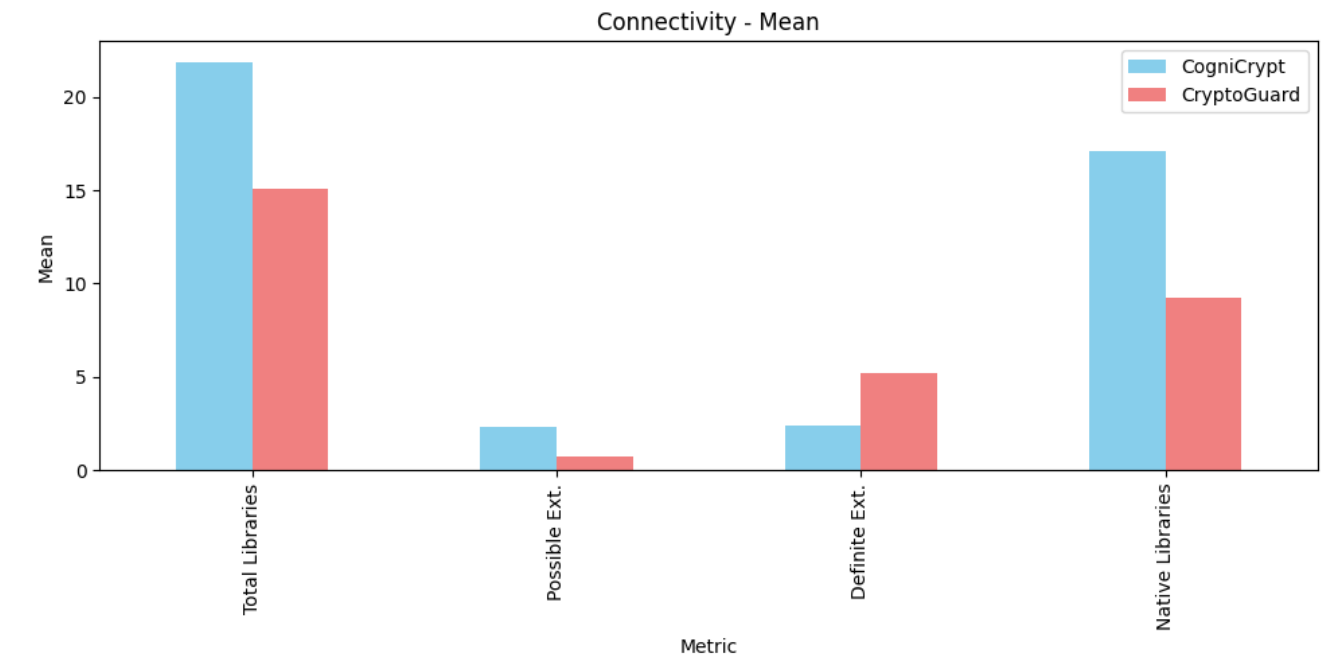
As figuras subsequentes ilustram uma análise comparativa categorizada entre as ferramentas CogniCrypt e CryptoGuard

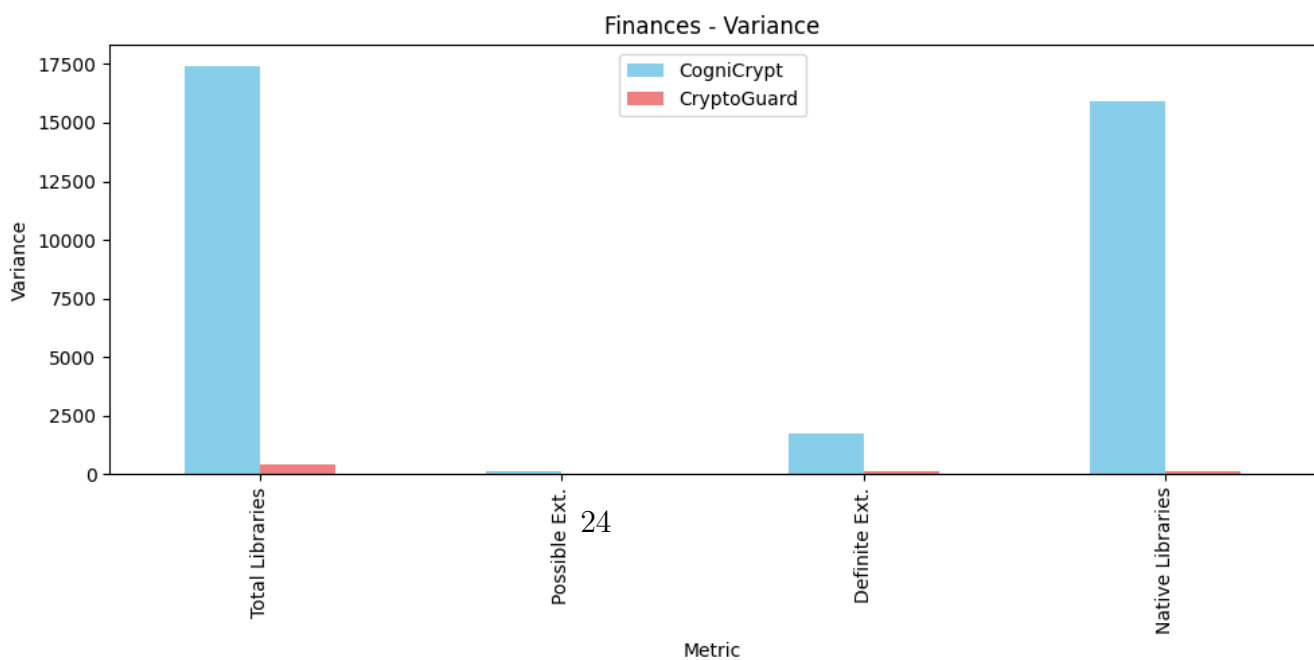
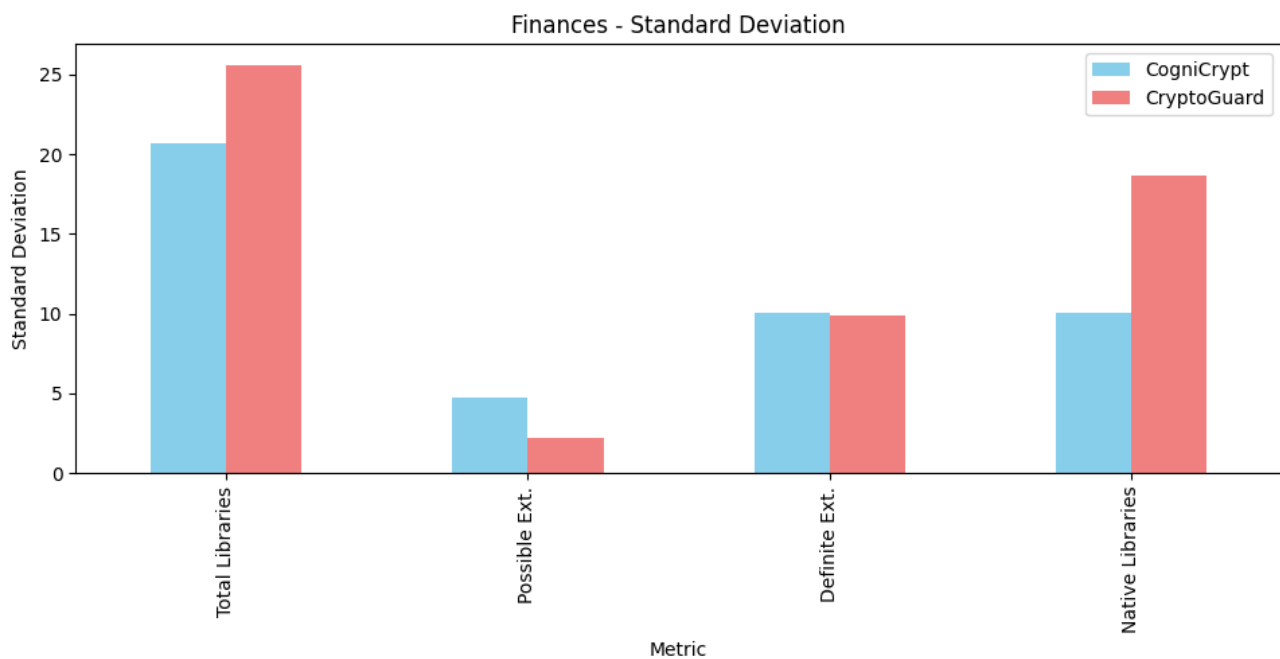
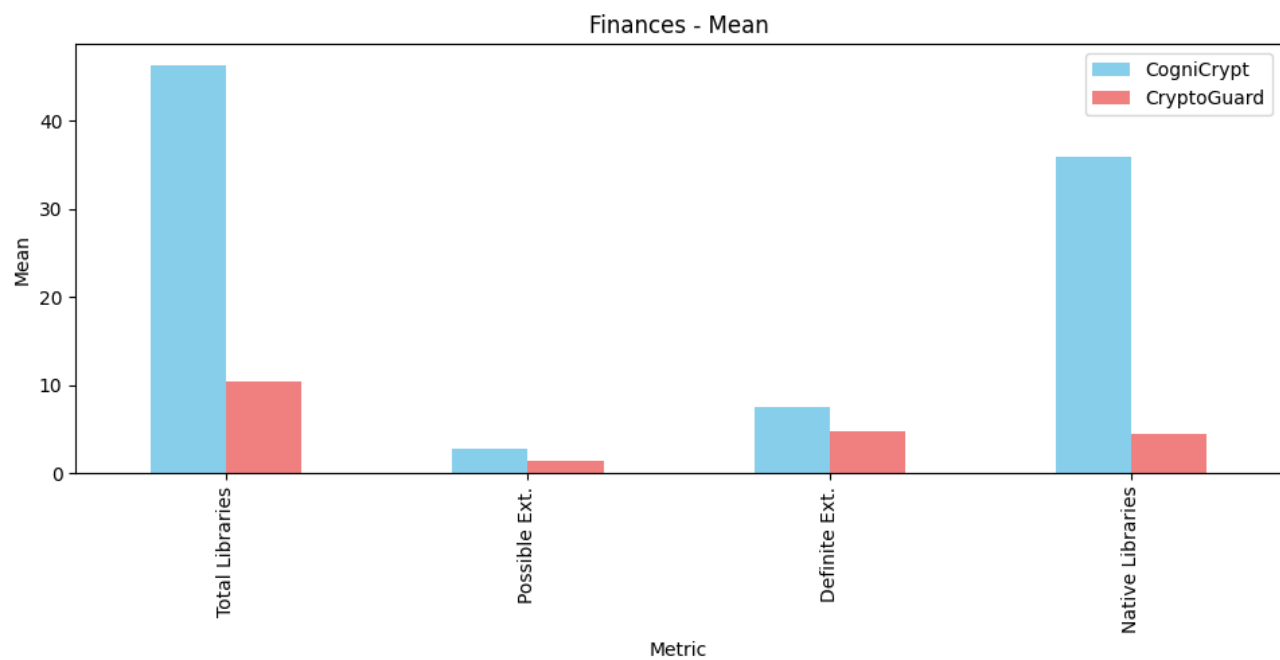
Na categoria de conectividade (4.4), a média de alertas emitidos pelas ferramentas indica que o CogniCrypt gera um número maior de alertas por aplicativo, incluindo alertas nativos e potencialmente externos. Contudo, o CryptoGuard excede no número de alertas definitivamente classificados como externos. O CogniCrypt apresenta um desvio padrão e uma variância superiores, com exceção da quantidade de alertas de bibliotecas categorizadas como definitivamente externas. A eficiência na integração com o LibScout, para a identificação de bibliotecas definitivamente externas, é mais pronunciada no CryptoGuard.

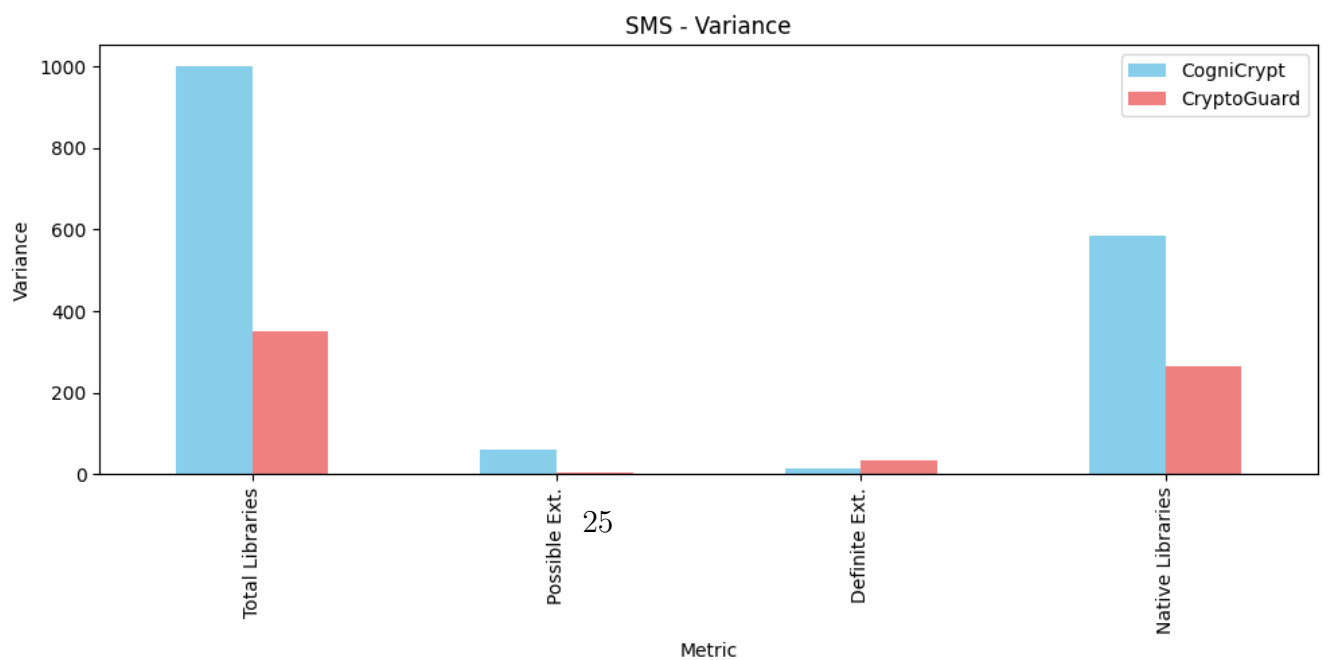
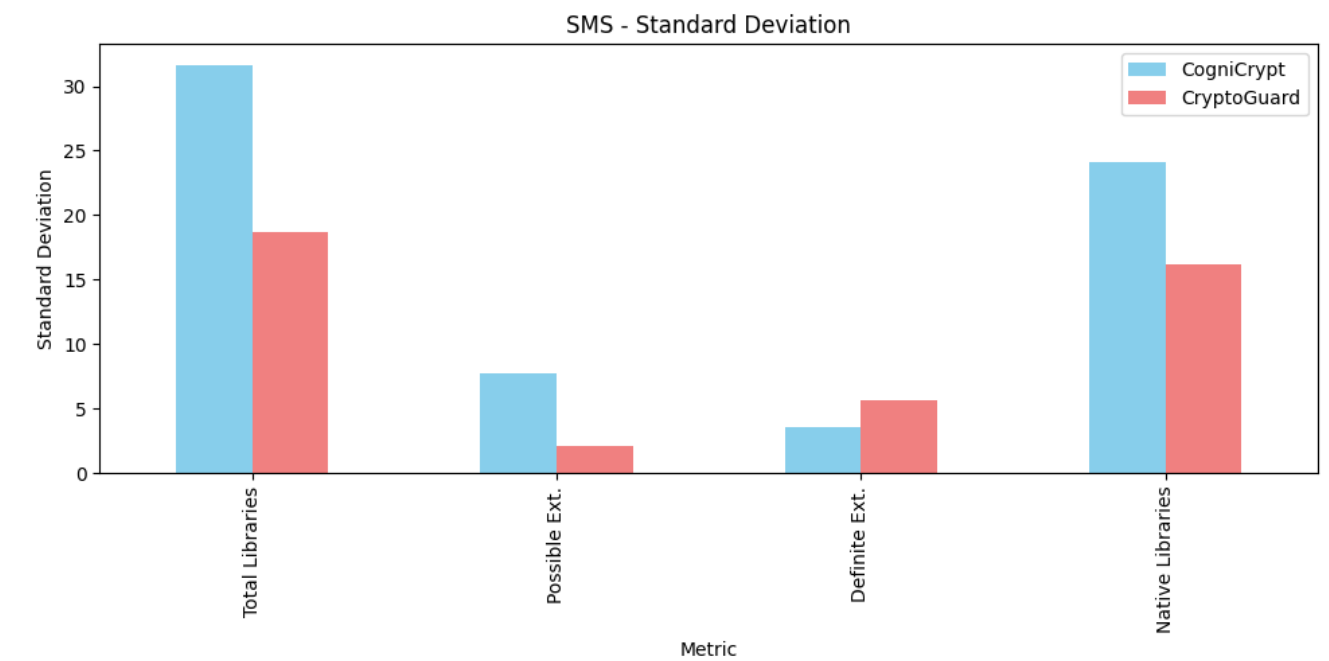
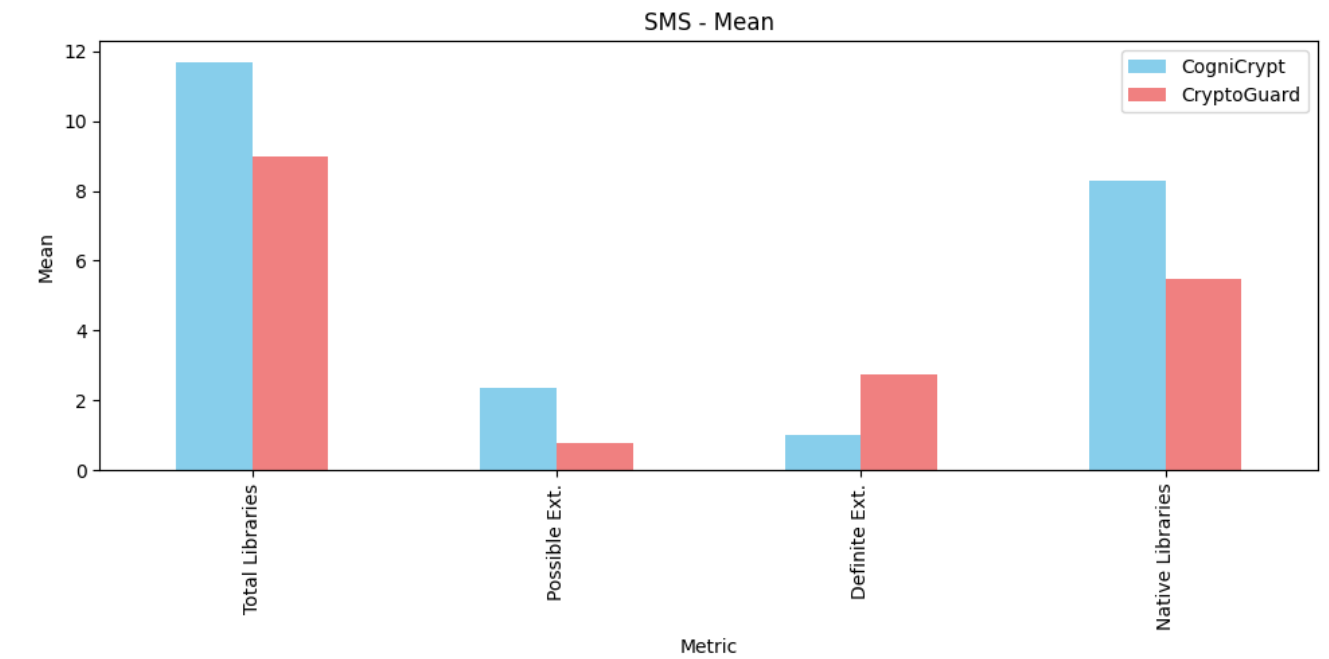
Na categoria financeira (4.5), o CogniCrypt demonstrou superioridade em relação ao CryptoGuard. Isso indica que o CryptoGuard tem uma dispersão maior nos valores relativos aos alertas por aplicativo e aos alertas de bibliotecas nativas, em contraste com a maior

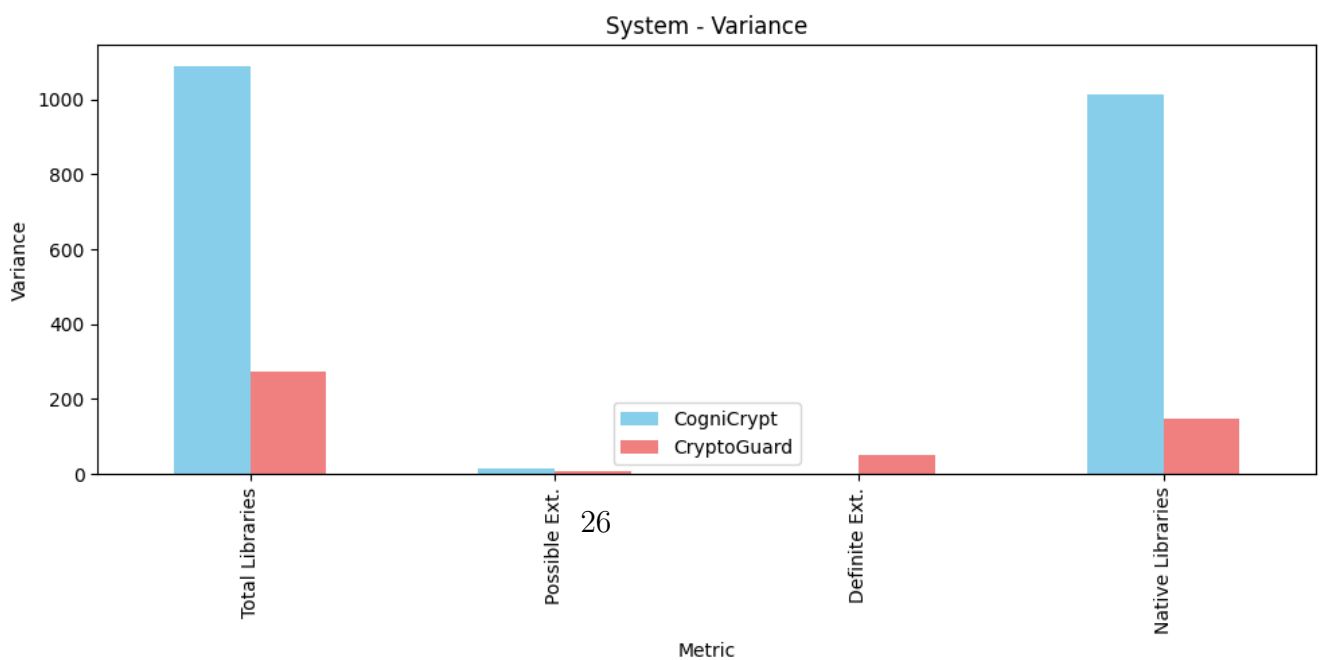
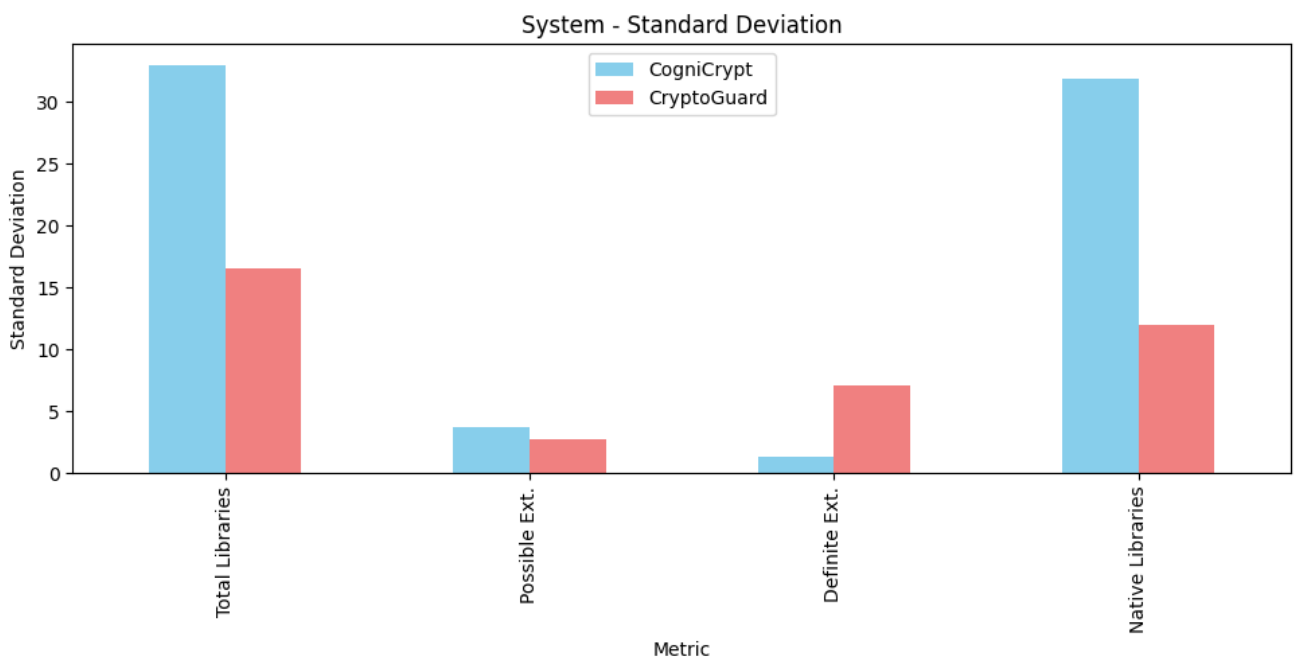
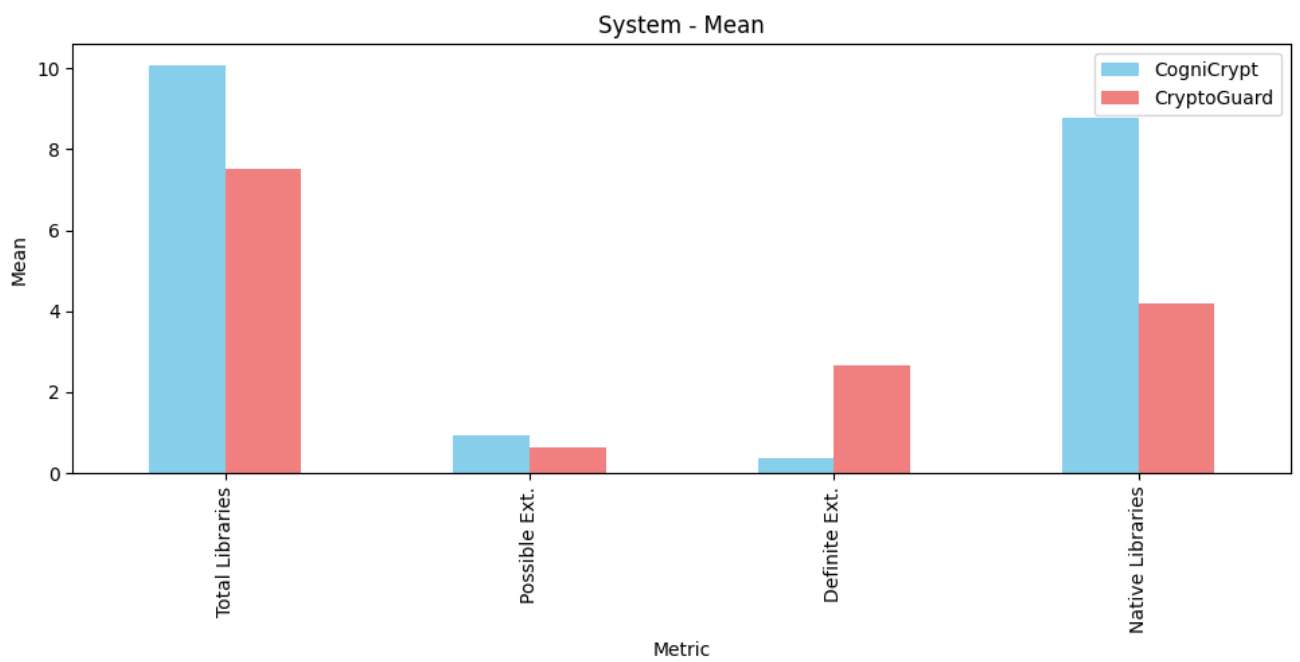
dispersão do CogniCrypt nos valores de alertas possivelmente de bibliotecas externas e definitivamente externas.

Nas categorias de SMS (4.6) e Sistemas (4.7), observa-se um padrão análogo ao da categoria de conectividade. O CogniCrypt gera uma quantidade superior de alertas por aplicativo, incluindo uma maior frequência de alertas nativos e potencialmente externos. Em contrapartida, o CryptoGuard excede no número de alertas categorizados como definitivamente externos. Esta tendência também se reflete no desvio padrão e na variância, onde o CogniCrypt mostra maior dispersão de dados, à exceção dos alertas definitivamente externos.









Capítulo 5

Conclusão

5.1 Conclusão

Este estudo se concentrou na avaliação comparativa entre as ferramentas CogniCrypt, CryptoGuard e LibScout para melhorar a detecção de vulnerabilidades em APIs criptográficas Java. As descobertas evidenciam que a integração destas ferramentas aprimora significativamente a precisão e a eficácia na identificação de falhas de segurança, oferecendo uma abordagem holística e mais robusta para a segurança de aplicações Java.

A ferramenta CryptoGuard identificou menos bibliotecas externas em comparação com o CogniCrypt, porém, ambas as ferramentas trouxeram resultados favoráveis para a detecção da origem do código malicioso.

As implicações destas descobertas podem ser úteis para a comunidade de desenvolvedores Java. A utilização integrada destas ferramentas pode contribuir para as práticas atuais de desenvolvimento seguro, permitindo uma identificação mais rápida e precisa de vulnerabilidades. Isso não apenas melhora a segurança das aplicações, mas também otimiza o processo de desenvolvimento, economizando tempo e recursos. [6]

O estudo enfrentou limitações, como a complexidade na análise de código obfuscado [2], que impactam a eficácia das ferramentas. Estas limitações destacam a necessidade contínua de aprimoramento na tecnologia de detecção de vulnerabilidades, reforçando a importância de abordagens adaptativas e inovadoras na segurança cibernética.

Para pesquisas futuras, sugere-se o desenvolvimento de metodologias mais avançadas e aprimoramento das ferramentas existentes para abordar novos desafios de segurança. A expansão do escopo para outras linguagens de programação e plataformas pode oferecer uma contribuição mais abrangente para a segurança de aplicações. Também é recomendado um set de dados mais amplo e diversificado para avaliar a eficácia das ferramentas.

A segurança em APIs criptográficas Java é de suma importância no cenário digital atual. Este estudo contribui para este campo, oferecendo insights valiosos e abrindo

caminho para futuras inovações. A necessidade de pesquisa contínua e desenvolvimento de novas soluções de segurança é clara, dada a evolução constante das ameaças cibernéticas.

Referências

- [1] Richards, Kathleen: *Cryptography*. <https://www.techtarget.com/searchsecurity/definition/cryptography>, acesso em 2023-10-03. 1, 4
- [2] Zhang, Ying, Md Mahir Asef Kabir, Ya Xiao, Danfeng Yao e Na Meng: *Automatic detection of java cryptographic api misuses: Are we there yet?* IEEE Transactions on Software Engineering, 49(1):288–303, 2023. 1, 5, 6, 27
- [3] Krüger, Stefan, Sarah Nadi, Michael Reif, Karim Ali, Mira Mezini, Eric Bodden, Florian Göpfert, Felix Günther, Christian Weinert, Daniel Demmler e Ram Kamath: *Cognicrypt: Supporting developers in using cryptography*. Em *2017 32nd IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE)*, páginas 931–936, Oct 2017. 1, 8, 9
- [4] Rahaman, Sazzadur, Ya Xiao, Sharmin Afrose, Fahad Shaon, Ke Tian, Miles Frantz, Danfeng, Yao e Murat Kantarcioglu: *Cryptoguard: High precision detection of cryptographic vulnerabilities in massive-sized java projects*, 2019. 1, 9
- [5] Zhan, Xian, Lingling Fan, Tianming Liu, Sen Chen, Li Li, Haoyu Wang, Yifei Xu, Xiapu Luo e Yang Liu: *Automated third-party library detection for android applications: Are we there yet?* Em *Proceedings of the 35th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering, ASE '20*, página 919–930, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery, ISBN 9781450367684. <https://doi.org/10.1145/3324884.3416582>. 1, 6, 7, 8
- [6] Bonifacio, Amaral, Monteiro: *Perceptions of software practitioners regarding crypto-api misuses and vulnerabilities*. IEEE Transactions on Software Engineering, 49, 2023. 1, 2, 10, 12, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 27
- [7] Derr, Erik: *Libscout*. <https://github.com/reddr/LibScout>, 2019. 2, 8, 19, 20
- [8] Lazar, David, Haogang Chen, Xi Wang e Nickolai Zeldovich: *Why does cryptographic software fail? a case study and open problems*. Em *Proceedings of 5th Asia-Pacific Workshop on Systems, APSys '14*, New York, NY, USA, 2014. Association for Computing Machinery, ISBN 9781450330244. <https://doi.org/10.1145/2637166.2637237>. 5
- [9] Torres, A., P. Costa, L. Amaral, J. Pastro, R. Bonifacio, M. d’Amorim, O. Legunsen, E. Bodden e E. Dias Canedo: *Runtime verification of crypto apis: An empirical study*. IEEE Transactions on Software Engineering, (01):1–16, aug 5555, ISSN 1939-3520. 5