



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO - BICOCCA
Dipartimento di Informatica, Sistemistica e Comuni-
cazione
Corso di Laurea in Informatica

Piattaforma web per la ricerca automatica di vulnerabilità in file binari

Relatore: Prof. Claudio Ferretti

Correlatore: Dott.sa Martina Saletta

Tesi di Laurea di:
Andrea Consonni
Matricola 900116

Anno Accademico 2024-2025

*Vorrei esprimere i miei più sentiti ringraziamenti al **prof. Claudio Ferretti**, alla **Dott.sa Martina Saletta** e al **prof. Giovanni Denaro** per il costante supporto, la disponibilità e i preziosi consigli offerti durante tutto il percorso di tesi.*

*Un ringraziamento speciale va alla **mia famiglia**, che con il suo supporto incondizionato mi ha permesso di affrontare con serenità questo percorso di studi.*

*Sono profondamente grato anche **a tutti i miei amici**, il quale costante sostegno mi ha accompagnato e incoraggiato lungo tutto il percorso universitario*

Abstract

La sicurezza informatica è sempre più centrale nello sviluppo software, soprattutto quando si analizzano applicazioni senza accesso al codice sorgente. Questa tesi presenta Binoculars, una piattaforma web pensata per semplificare l'analisi di sicurezza di file binari ELF per architettura x86. Basata su angr, Flask e SvelteKit, la piattaforma offre un'interfaccia intuitiva che consente anche ad analisti non specialisti di effettuare una prima valutazione automatizzata, facilitando l'identificazione di potenziali vulnerabilità.

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Differenza tra debolezza e vulnerabilità	1
1.2	Struttura della relazione	2
2	Stato dell'arte	3
2.1	Metodologie basate su tecniche di analisi statica	3
2.1.1	Taint analysis statica	3
2.1.2	Binary Code Similarity Detection	4
2.2	Metodologie basate su tecniche di analisi dinamica	5
2.2.1	Fuzzing	6
2.3	Tecniche basate su modelli di apprendimento automatico	7
	Bibliografia	8

Capitolo 1

Introduzione

In un mondo sempre più digitalizzato ed interconnesso, la tematica della sicurezza informatica ha assunto sempre più un'importanza chiave in ogni processo di sviluppo software. La potenziale presenza e lo sfruttamento di una vulnerabilità all'interno di un'applicazione da parte di un'attaccante potrebbe avere conseguenze disastrose: dall'escalation di privilegi all'accesso non autorizzato a dati sensibili, compromettendo quindi l'integrità e la confidenzialità di quest'ultimi. È quindi fondamentale che i potenziali rischi per la sicurezza siano considerati sin dai primi momenti del processo di sviluppo. Effettuare un'analisi di sicurezza approfondita risulta quindi fondamentale nell'evitare che potenziali vulnerabilità persistano all'interno del programma; tuttavia, questo processo si complica notevolmente quando l'analista è in **solo possesso del file binario** e non ha accesso al codice sorgente dell'applicazione. In questo caso, l'analista non solo dovrà avere ampie competenze specifiche in ambito di reverse engineering, ma dovrà essere in grado di utilizzare tool e framework che potrebbero avere un'interfaccia a primo impatto ostica, richiedere conoscenze di scripting o di tematiche di sicurezza avanzate oppure avere un costo elevato, il quale potrebbe non rientrare nei limiti di budget prefissati. Questa tesi propone l'implementazione di una piattaforma web per l'analisi di file binari denominata **Binoculars**; la quale si prefigge l'obiettivo di semplificare il processo di analisi di sicurezza su file binari ELF compilati per architettura x86 tramite un'interfaccia semplice ed intuitiva, permettendo anche ad analisti con competenze di sicurezza non specialistiche di effettuare una prima valutazione del programma, la quale potrà poi essere approfondita tramite analisi più specifiche. La piattaforma si basa su **angr**, un toolkit open-source multi-architettura per l'analisi binaria, per eseguire automaticamente diverse tipologie di analisi statiche e dinamiche, sul framework python **Flask** per l'implementazione di una REST API progettata per comunicare i risultati dell'analisi e sul framework javascript **SvelteKit**, il quale si occupa della strutturazione delle pagine web della piattaforma e della presentazione dei risultati dell'analisi all'utente.

1.1 Differenza tra debolezza e vulnerabilità

Spesso il termine "vulnerabilità" è utilizzato per riferirsi ad una qualsiasi problematica di sicurezza all'interno del software sotto analisi. Tuttavia, è fondamentale distinguere il concetto di **vulnerabilità** da quello di **debolezza**. Per delineare con precisione questa distinzione, adotteremo le definizioni fornite dal glossario compilato dal MITRE [1]:

- **Debolezza**: Una condizione nel software, firmware, hardware o in una compo-

nente di servizio che, sotto certe circostanze, potrebbe contribuire all'introduzione di vulnerabilità

- **Vulnerabilità:** Un errore nel software, firmware, hardware o componente di servizio **derivante dalla presenza di una debolezza** che può essere sfruttata da un'attaccante, causando un impatto negativo sull'integrità, la confidenzialità e la disponibilità dei componenti impattati

Una vulnerabilità è quindi **un'istanza sfruttabile di una debolezza**. Per riferirci alle categorie di difetti che le tecniche di analisi automatica offerte dalla piattaforma sono in grado di rivelare, questa tesi adotterà la tassonomia **Common Weakness Enumeration** (CWE), anch'essa compilata dal MITRE.

1.2 Struttura della relazione

La relazione è articolata nei seguenti capitoli:

- **Capitolo 2: Stato dell'arte:** Questo capitolo presenta una rassegna di alcune tecniche, metodologie e soluzioni esistenti per l'analisi di file binari. Verrà evidenziato l'approccio adottato per affrontare il problema della ricerca di vulnerabilità e i rispettivi limiti di ogni soluzione presentata.
- **Capitolo 3: Metodologie utilizzate:** Questo capitolo discute i fondamenti teorici che costituiscono la base delle analisi implementate dalla piattaforma. Saranno discussi in dettaglio sia i concetti di **disassembling** e **decompiling** sia le metodologie di analisi statica e dinamica utilizzate per effettuare la ricerca delle vulnerabilità. Verranno inoltre forniti degli esempi per illustrarne il funzionamento.
- **Capitolo 4: Tecnologie utilizzate:** Questo capitolo presenta in dettaglio le tecnologie e i framework scelti per l'implementazione della piattaforma. Saranno presentati sia i componenti del backend sia le tecnologie adottate per lo sviluppo del frontend.
- **Capitolo 5: Analisi implementate:** Questo capitolo illustra nel dettaglio le analisi implementate all'interno della piattaforma. Verrà descritto come ciascuna tecnica di analisi porti al rilevamento di una vulnerabilità e verrà fornita una lista comprensiva di tutte le debolezze software che ogni tecnica è capace di rilevare.
- **Capitolo 6: Architettura della soluzione:** Questo capitolo descrive l'architettura generale della piattaforma Binoculars. Verrà illustrato il modello architetturale della soluzione, illustrando le interazioni fra i vari componenti e come essi collaborano per presentare all'utente il risultato dell'analisi richiesta
- **Capitolo 7: Sperimentazione** Questo capitolo presenta le varie sperimentazioni effettuate sulla piattaforma al fine di validarne l'accuratezza. Per ogni tecnica di analisi implementata, verranno presentati i programmi che sono stati utilizzati al fine di validare l'efficacia e l'accuratezza dell'analisi e i risultati prodotti da quest'ultima
- **Capitolo 8: Conclusioni:** Questo capitolo presenterà le conclusioni finali del lavoro. Saranno inoltre esposte le limitazioni e le problematiche incontrate durante l'implementazione della piattaforma e i suoi possibili sviluppi futuri

Capitolo 2

Stato dell'arte

Questo capitolo tratta una rassegna di alcune metodologie, tecniche e soluzioni attualmente disponibili per risolvere il problema della ricerca automatica di vulnerabilità in file binari. Verranno in particolare approfonditi alcuni approcci basati su analisi statica, analisi dinamica e su tecniche di apprendimento automatico. Per ciascuna metodologia presentata, verranno dettagliati il suo funzionamento generale, le sue capacità di analisi e le sue limitazioni

2.1 Metodologie basate su tecniche di analisi statica

L'analisi statica di un programma consiste in un'insieme di metodologie, tool e algoritmi che permettono l'analisi del codice sorgente o della sua rappresentazione binaria (per esempio, un file eseguibile) senza che il programma venga effettivamente eseguito [2]. Questa tecnica è ampiamente adottata nell'ambito della ricerca delle vulnerabilità, in quanto consente di inferire e determinare se certe proprietà sono soddisfatte (per esempio, le condizioni che possono portare ad una certa vulnerabilità) senza direttamente eseguire il programma. Tuttavia, l'analisi statica condotta direttamente su un file binario è intrinsecamente più complessa rispetto all'analisi statica del codice sorgente: le principali difficoltà risiedono nella mancanza di informazioni riguardante i tipi e la struttura ad alto livello del codice [3] e nella necessità di gestire e rappresentare adeguatamente le operazioni riguardanti la memoria [4]. Nonostante queste sfide, nel corso degli anni sono stati sviluppati diversi approcci e metodologie di analisi statica progettati per effettuare la ricerca di vulnerabilità all'interno di file binari. Queste tecniche, tuttavia, possono produrre un elevato numero di falsi positivi e falsi negativi : poiché non effettuano un'esecuzione concreta del programma, esse devono effettuare diverse assunzioni sul suo stato a runtime. Ciò potrebbe quindi portare i tool basati su questa tipologia di analisi a segnalare vulnerabilità in porzioni di programma non vulnerabili.

2.1.1 Taint analysis statica

La *taint analysis* (o *taint checking*) è una tecnica di analisi che mira a tracciare e monitorare la propagazione di flussi di dati inaffidabili o potenzialmente dannosi all'interno del programma. La taint analysis si compone di tre elementi chiave:

1. **Sorgenti** (Sources): Sono i punti del programma dove si origina un flusso di dati inaffidabile. Una sorgente potrebbe per esempio essere l'input di un utente oppure i dati letti da un file.

2. **Propagazione:** Viene effettuato un monitoraggio continuo della propagazione nel programma dei dati provenienti da una sorgente
3. **Sink:** Sono i punti del programma che effettuano operazioni sensibili, come per esempio l'accesso al filesystem o la chiamata ad operazioni di libreria non sicure.

Una possibile vulnerabilità verrà quindi rilevata quando il programma permette ad un dato "tainted" di raggiungere un sink; ciò può avvenire quando, per esempio, il dato non viene adeguatamente sanificato.

Bintaint è un tool di parsing capace di effettuare taint analysis statica su file binari [5]. Il taint analyzer proposto è basato sul tool commerciale di reverse engineering *IDA*, il quale viene utilizzato per recuperare il codice assembly dal codice binario, ed è implementato utilizzando il linguaggio funzionale *OCaml*. Bintaint è composto da quattro moduli distinti:

- **Decoder module:** Questo modulo si occupa di tradurre il codice assembly recuperato da IDA in una rappresentazione in un linguaggio intermedio chiamato *REIL* (Reverse Engineering Intermediate Language), le quali espressioni verranno a loro volta convertite in espressioni simboliche.
- **Taint Processing Configuration Module:** Questo modulo gestisce la configurazione per l'inizializzazione della taint analysis, leggendo la configurazione fornita dall'utente in formato XML, la quale dovrà contenere tutte le informazioni necessarie per effettuare la taint analysis. Questo modulo si occupa inoltre di stabilire una relazione tra l'input esterno e le varie sorgenti definite
- **Expression Parsing Module:** Questo modulo si occupa di definire come avviene la propagazione dei flussi di dati tainted all'interno del programma
- **TCFG Generation Module:** Questo modulo si occupa di generare una struttura a grafo diretta chiamata *Taint Control Flow Graph*, la quale rappresenterà tutte le possibili aree del programma che un determinato flusso tainted può raggiungere. L'analisi del TCFG permetterà quindi di evincere se un determinato sink dipende dai dati generati da una determinata sorgente.

L'approccio proposto dal tool permette di ridurre il numero di falsi positivi e falsi negativi rilevati rispetto ad una taint analysis tradizionale; inoltre, l'utilizzo del linguaggio intermedio REIL permette al tool di essere facilmente integrabile in sistemi di analisi più complessi, a patto che anch'essi utilizzino lo stesso linguaggio di rappresentazione intermedia. Tuttavia il tool risulta comunque dipendente dall'input dell'analista; l'accuratezza dell'analisi dipenderà quindi dalla corretta definizione di sorgenti, sink e propagazione da parte di quest'ultimo. Infine, Bintaint si basa sul framework commerciale IDA, il quale non offre tutte le sue funzionalità nella sua versione gratuita.

2.1.2 Binary Code Similarity Detection

Quando l'obiettivo dell'analisi è ricercare una vulnerabilità nota (per esempio, una debolezza già documentata), è possibile adottare una strategia chiamata *Binary Code Similarity Detection* (BCSD). Questo approccio si basa sul confronto il codice binario del programma in esame con la firma (il codice binario) della vulnerabilità. Se l'algoritmo di analisi rileva segmenti di codice con un elevato grado di somiglianza con la firma della

vulnerabilità, allora è altamente probabile che il programma contenga quella vulnerabilità. Un algoritmo di decisione determinerà se il programma contiene effettivamente la vulnerabilità. Tuttavia, poiché il codice contenente la vulnerabilità spesso richiede solo piccole modifiche per fare in modo che esso non sia più vulnerabile (l'aggiunta di un controllo, l'impostazione di permessi aggiuntivi, ...), il codice binario del programma corretto e il programma originale saranno molto simili; potenzialmente portando l'analizzatore a segnalare dei falsi positivi [6].

VulneraBin [7] è un tool che effettua un'analisi BCSD attraverso una metrica di similarità basata su hashing, strutturando il processo nelle seguenti fasi:

1. **Re-ottimizzazione del linguaggio di rappresentazione intermedia (IR):** Il codice assembly viene dapprima tradotto nel linguaggio di rappresentazione intermedia VEX-IR, il quale utilizzo mira ad appiattire le eventuali differenze sintattiche derivanti dall'utilizzo di registri diversi, istruzioni diverse per l'assegnamento o metodologie di ottimizzazione introdotte dai vari compilatori. Successivamente, viene applicata un'ulteriore ottimizzazione sul codice intermedio per eliminare le differenze residue che potrebbero ancora persistere a causa delle diverse tecniche di ottimizzazione dei compilatori.
2. **Program Slicing:** Il program slicing è una tecnica di analisi statica che, partendo da un sottoinsieme dei comportamenti di un programma, ne produce una versione minimale, chiamata "slice", la quale mantiene esattamente lo stesso sottoinsieme di comportamenti. Poiché questa tecnica è alla base delle analisi offerte dalla piattaforma, verrà ulteriormente approfondita nel *Capitolo 3* di questa tesi.
3. **Strand normalization:** Una "strand" è definita come l'insieme di istruzioni contigue richieste per computare il valore di una specifica variabile [8]. Gli strand vengono normalizzati rinominando i registri utilizzati durante le varie operazioni, andando così ad eliminare eventuali differenze sintattiche introdotte dai compilatori.
4. **Similarity evaluation:** Viene effettuato un confronto fra gli hash MD5 calcolati sugli strand normalizzati e gli hash delle vulnerabilità contenute in un database. Se la similarità supera una certa soglia definita manualmente, allora il binario sarà considerato vulnerabile.

Nonostante l'approccio proposto porti ad un miglioramento della complessità computazionale dell'analisi e alla mitigazione del numero di falsi positivi e negativi rilevati, l'affidabilità dell'analisi rimane comunque legata ad una soglia scelta manualmente dall'analista. Sarà quindi necessario che quest'ultimo imposti una soglia ottimale per ogni specifico binario o classe di vulnerabilità, compromettendo quindi l'automazione del processo.

2.2 Metodologie basate su tecniche di analisi dinamica

L'analisi dinamica consiste nell'osservazione del comportamento di un programma mentre esse viene eseguito in un determinato ambiente d'esecuzione. Per consentire questo tipo di analisi, i tool che implementano questo tipo di tecniche devono effettuare un processo chiamato *instrumentation*, il quale consiste nell'aggiungere codice di analisi all'interno del programma da analizzare in modo tale che venga eseguito insieme a quest'ultimo

senza modificarne il normale flusso di esecuzione [9]. I risultati ottenuti tramite l'analisi dinamica sono generalmente più precisi rispetto ai risultati ottenuti effettuando un'analisi statica del programma, poiché non vi è più la necessità di effettuare un'astrazione riguardo i valori computati o il cammino intrapreso dal programma sotto analisi. Tuttavia, poiché l'esecuzione concreta di un programma richiede la scelta di un insieme di input concreti con il quale eseguirlo, i risultati ottenuti tramite queste tecniche non sono generalizzabili, in quanto l'insieme di input scelto potrebbe non essere rappresentativo di tutti i possibili cammini d'esecuzione del programma [10].

2.2.1 Fuzzing

Il fuzzing è una tecnica di analisi dinamica che consiste nell'osservare il comportamento del programma quando esso riceve degli input casuali o malformati. Se un input provoca un blocco dell'esecuzione o un crash, allora il programma potrebbe allora contenere una problematica di implementazione oppure una debolezza software, la quale, sotto certe circostanze, potrebbe risultare sfruttabile da un potenziale attaccante. Questa tecnica viene implementata attraverso programmi specializzati, chiamati *fuzzers*; un esempio noto è **American Fuzzy Lop** (AFL). Generalmente, i principali componenti del fuzzing (e di un fuzzer) sono[11]:

- **Programma obbiettivo:** Il programma da analizzare, il quale può essere rappresentato sia dal suo codice binario sia dal suo codice sorgente. Poiché l'accesso a quest'ultimo è a volte ostico in situazioni reali, i software di fuzzing hanno spesso come programma obbiettivo il solo codice binario.
- **Monitor:** Raccoglie informazioni riguardanti l'esecuzione del programma.
- **Input generator:** Si occupa della generazione degli input, la quale può avvenire in due modi distinti:
 - **Grammar-based:** Gli input vengono generati utilizzando una grammatica
 - **Mutation-based:** Gli input vengono generati usando dei file seed, i quali vengono mutati casualmente oppure utilizzando delle strategie di mutazione ben definite.
- **Bug detector:** Quando il programma va in crash o riporta degli errori, questo modulo recupera e analizza le informazioni rilevanti per determinare se vi è la presenza di un "bug" (una debolezza, una vulnerabilità, ...).
- **Bug filter:** Non tutti i "bug" sono effettivamente delle vulnerabilità; è quindi necessaria un'operazione di filtraggio per scartare tutte quelle problematiche che non risultano sfruttabili da un attaccante.

Inoltre, le tecniche di fuzzing possono essere divise in tre categorie [12]:

- **White-box fuzzing:** In questo tipo di fuzzing, si assume di avere accesso al codice sorgente del programma; la maggior parte delle informazioni per generare l'input viene quindi acquisita tramite l'analisi del codice sorgente
- **Black-box fuzzing:** Nel fuzzing black-box si effettua il fuzzing sul programma senza avere nessuna informazione sulla sua struttura interna

- **Gray-box fuzzing:** Questo tipo di fuzzer effettuano un'analisi del programma (come taint analysis o tramite instrumentation) per ottenere le informazioni sulla struttura interna di quest'ultimo

Seppur sia una tecnica efficiente e ben conosciuta per effettuare l'analisi di un programma, il fuzzing risente di diverse problematiche, come la necessità, nei fuzzer gray-box e black-box, di generare un input che passi i controlli di sanificazione del programma senza avere informazioni su quest'ultimo, permettendo così un'analisi più approfondita del programma. Altra problematica è quella legata alla definizione, nei fuzzer mutation-based, di una buona tecnica di mutazione dell'input, in modo da poter analizzare il maggior numero possibile di cammini di esecuzione interessanti. Per i tool di fuzzing, quindi, la problematica principale da superare è quella di **implementare una buona strategia di generazione e mutazione dell'input**, in modo tale che essa permetta all'analisi di essere il più approfondita possibile.

2.3 Tecniche basate su modelli di apprendimento automatico

Negli ultimi anni, la ricerca nell'ambito dell'intelligenza artificiale ha compiuto enormi progressi, portando i modelli disponibili ad essere sempre più accurati ed efficienti. Questo rapido avanzamento ha interessato anche l'ambito della sicurezza informatica: le capacità messe a disposizione dai modelli di intelligenza artificiale, in particolare dalle tecniche di machine learning, possono infatti essere sfruttate per la ricerca automatica di vulnerabilità. Le tecniche di machine learning possono dividere in base a come avviene l'addestramento del modello:

- **Apprendimento supervisionato:** Si sviluppa un modello predittivo tramite l'addestramento su dati etichettati.
- **Apprendimento non supervisionato:** Il modello viene applicato su un'insieme di dati non etichettati con lo scopo di trovare una qualche struttura intrinseca del dataset
- **Apprendimento per rinforzo:** Il modello apprende come raggiungere un dato obiettivo, ricevendo una ricompensa o una penalità in base a quanto la scelta che ha compiuto lo avvicina all'obiettivo

In generale, le tecniche di machine learning per la ricerca di vulnerabilità estraggono delle feature dal file binario sotto analisi; queste feature verranno poi codificate in un formato adatto per il modello e utilizzate per effettuare un riconoscimento di eventuali percorsi di esecuzione vulnerabili [13]. Sono state proposti diversi approcci basati su machine learning, per esempio *Aumpansub & Huang* [14] propongono di estrarre le informazioni sintattiche dal codice assembly e di addestrare due modelli per il riconoscimento, mentre

Bibliografia

- [1] MITRE, *Common Weakness Enumeration Glossary*, Accesso effettuato il 26 settembre 2025, 2024. indirizzo: <https://cwe.mitre.org/documents/glossary/>.
- [2] P. Thomson, «Static analysis,» *Commun. ACM*, vol. 65, n. 1, pp. 50–54, dic. 2021, ISSN: 0001-0782. DOI: 10.1145/3486592. indirizzo: <https://doi.org/10.1145/3486592>.
- [3] Y. Xu et al., «A Review of Code Vulnerability Detection Techniques Based on Static Analysis,» in *Computational and Experimental Simulations in Engineering*, S. Li, cur., Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 251–272, ISBN: 978-3-031-44947-5.
- [4] G. Balakrishnan, R. Gruian, T. Reps e T. Teitelbaum, «CodeSurfer/x86—A platform for analyzing x86 executables,» in *Proceedings of the 14th International Conference on Compiler Construction*, ser. CC’05, Edinburgh, UK: Springer-Verlag, 2005, pp. 250–254, ISBN: 3540254110. DOI: 10.1007/978-3-540-31985-6_19. indirizzo: https://doi.org/10.1007/978-3-540-31985-6_19.
- [5] Z. Feng, Z. Wang, W. Dong e R. Chang, «Bintaint: A Static Taint Analysis Method for Binary Vulnerability Mining,» in *2018 International Conference on Cloud Computing, Big Data and Blockchain (ICCB)*, 2018, pp. 1–8. DOI: 10.1109/ICCB.2018.8756383.
- [6] W. Qingyang, H. Quanrui, N. Yuqiao, B. Chenya, G. Zhen e S. Shiwen, «A Survey of Binary Code Security Analysis,» in *2023 6th International Conference on Data Science and Information Technology (DSIT)*, 2023, pp. 42–49. DOI: 10.1109/DSIT60026.2023.00015.
- [7] Z. Tai, H. Washizaki, Y. Fukazawa, Y. Fujimatsu e J. Kanai, «Binary Similarity Analysis for Vulnerability Detection,» in *2020 IEEE 44th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC)*, 2020, pp. 1121–1122. DOI: 10.1109/COMPSAC48688.2020.0-110.
- [8] Y. David, N. Partush e E. Yahav, «Statistical similarity of binaries,» in *Proceedings of the 37th ACM SIGPLAN Conference on Programming Language Design and Implementation*, ser. PLDI ’16, Santa Barbara, CA, USA: Association for Computing Machinery, 2016, pp. 266–280, ISBN: 9781450342612. DOI: 10.1145/2908080.2908126. indirizzo: <https://doi.org/10.1145/2908080.2908126>.
- [9] N. Nethercote, «Dynamic binary analysis and instrumentation,» University of Cambridge, Computer Laboratory, rapp. tecn. UCAM-CL-TR-606, nov. 2004. DOI: 10.48456/tr-606. indirizzo: <https://www.cl.cam.ac.uk/techreports/UCAM-CL-TR-606.pdf>.
- [10] M. Ernst, «Static and Dynamic Analysis: Synergy and Duality,» mag. 2003.

- [11] H. Liang, X. Pei, X. Jia, W. Shen e J. Zhang, «Fuzzing: State of the Art,» *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 67, n. 3, pp. 1199–1218, 2018. DOI: 10.1109/TR.2018.2834476.
- [12] J. Li, B. Zhao e C. Zhang, «Fuzzing: a survey,» *Cybersecurity*, vol. 1, dic. 2018. DOI: 10.1186/s42400-018-0002-y.
- [13] H. Xue, S. Sun, G. Venkataramani e T. Lan, «Machine Learning-Based Analysis of Program Binaries: A Comprehensive Study,» *IEEE Access*, vol. 7, pp. 65 889–65 912, 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2917668.
- [14] A. Aumpansub e Z. Huang, «Learning-based Vulnerability Detection in Binary Code,» in *Proceedings of the 2022 14th International Conference on Machine Learning and Computing*, ser. ICMLC '22, Guangzhou, China: Association for Computing Machinery, 2022, pp. 266–271, ISBN: 9781450395700. DOI: 10.1145/3529836.3529926. indirizzo: <https://doi.org/10.1145/3529836.3529926>.