

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione
Corso di Laurea in Ingegneria Informatica e dell'Automazione



RELAZIONE DI PROGETTO

Sistema Oracolo Bayesiano per Catena del Freddo Farmaceutica

Bayesian Oracle System for Pharmaceutical Cold Chain

Professore

Luca Spalazzi

Studenti

Luigi Greco

Andrea Altieri

Filippo Marchegiani

Luca Belardinelli

ANNO ACCADEMICO 2025-2026

Sommario

La catena del freddo farmaceutica rappresenta un processo critico in cui la garanzia dell'integrità dei prodotti è fondamentale per la salute pubblica. I sistemi tradizionali di monitoraggio spesso soffrono di problemi di centralizzazione, opacità e mancanza di automatismi affidabili.

Questa relazione propone un'architettura innovativa basata su Blockchain e Intelligenza Artificiale per l'automazione sicura e trasparente della validazione delle spedizioni. La soluzione implementata utilizza Smart Contract su rete Ethereum/Hyperledger Besu per orchestrare il processo di business e integra una Rete Bayesiana on-chain come oracolo decisionale. Questo permette di inferire probabilisticamente la conformità della spedizione a partire da evidenze parziali o rumorose provenienti da sensori IoT, garantendo che i pagamenti vengano sbloccati solo a fronte di condizioni verificate.

Il sistema è stato progettato seguendo un approccio Security-by-Design, adottando la metodologia DUAL-STRIDE-DUA per l'analisi delle minacce e l'identificazione di vulnerabilità sia intenzionali che accidentali. La validità e la resilienza della soluzione sono state verificate attraverso test distribuiti e analisi statica del codice, dimostrando come l'integrazione di logica probabilistica su blockchain possa offrire un livello superiore di sicurezza e fiducia nei processi logistici critici.

Parole chiave: Blockchain, Ethereum, Smart Contract, Rete Bayesiana, Supply Chain, Sicurezza, Threat Modeling, IoT

Indice	ii
Introduzione	1
1 Contesto e Obiettivi	2
1.1 Il problema della Catena del Freddo	2
1.2 Obiettivi del Progetto	2
1.2.1 1. Automazione tramite Smart Contract	2
1.2.2 2. Sicurezza del Dato (Data Integrity)	3
1.2.3 3. Validazione Logica (Data Validity)	3
2 Analisi e Progettazione Architettuale	4
2.1 Architettura Distribuita a Tre Livelli	4
2.1.1 Livello Blockchain (Data & Logic Layer)	4
2.1.2 Livello Middleware (Oracle Layer)	4
2.1.3 Livello Presentazione (Web Interface)	4
2.2 Focus Tecnologico: Hyperledger Besu	5
2.2.1 Consenso IBFT 2.0 (Istanbul Byzantine Fault Tolerance)	5
2.2.2 Permissioning Avanzato	5
2.3 Principi di Design Sicuro (Saltzer & Schroeder)	5
2.4 Analisi di Resistenza, Sopravvivenza e Ambiguità	6
3 Valutazione del Rischio e Threat Modeling	7
3.1 Modellazione i* (iStar)	7
3.1.1 Supply Chain As-Is (Senza Sistema)	7
3.1.2 Supply Chain To-Be (Con Sistema Blockchain)	7
3.1.3 Sistema e Attaccanti	7
3.2 Analisi DUAL-STRIDE	8
3.2.1 Identificazione degli Asset	8
3.2.2 Matrice delle Minacce (Riferimenti CAPEC/ATT&CK)	8
3.3 Abuse e Misuse Cases	9
3.3.1 Abuse Case: Iniezione Dati Falsi (Attaccante Interno)	9
3.3.2 Misuse Case: Smarrimento Chiave Privata (Utente Maldestro)	9

4	Programmazione Sicura e Dettagli Implementativi	10
4.1	Smart Contract e Logica On-Chain	10
4.1.1	BNCore: Il Motore Inferenziale	10
4.1.2	BNGestoreSpedizioni: Sicurezza Operativa	10
4.1.3	BNPagamenti: L'Attuatore Finanziario	10
4.1.4	Privacy e Offuscamento Dati	11
4.2	Sistema Oracolo e Simulazione IoT	11
4.2.1	Flow del Dato (Sensore → Blockchain)	11
4.3	Interfaccia Web (Dashboard Utente)	12
4.3.1	Ruolo: Mittente (Sender)	12
4.3.2	Ruolo: Corriere (Carrier)	12
4.3.3	Ruolo: Admin/Sensore (IoT Simulator)	12
4.4	Integrazione Web3 e Gestione Eventi	12
5	Verifica, Validazione e Modellazione Formale	13
5.1	Introduzione: Obiettivo della Modellazione	13
5.1.1	Contesto del Sistema	13
5.1.2	Scopo dell'Analisi di Markov Chain	13
5.1.3	Minacce Modellate	13
5.1.4	Contromisure Implementate	14
5.2	Modello PRISM: Sistema SENZA Contromisure	14
5.2.1	Struttura del Modello	14
	Dichiarazione del Tipo di Modello	14
	Variabili di Stato (Senza Active Defense)	14
5.2.2	Matrice di Transizione: Sistema SENZA Contromisure	14
5.2.3	Logica delle Transizioni: Sistema Vulnerabile	15
	Sensore OK → OK, FAILED, o COMPROMISED	15
	Sensore FAILED → OK, FAILED, o COMPROMISED	16
	Sensore COMPROMISED → COMPROMISED (Stato Assorbente)	16
5.2.4	Formule Derivate	16
5.3	Proprietà PCTL Verificate: Sistema SENZA Contromisure	16
5.3.1	Proprietà di Safety (S1)	16
	Codice PCTL	16
	Spiegazione della Formula	16
	Interpretazione	17
	Risultato PRISM	17
	Analisi del Risultato	17
5.3.2	Proprietà di Guarantee/Response (G1)	17
	Codice PCTL	17
	Spiegazione della Formula	17
	Interpretazione	17
	Risultato PRISM	17
	Analisi del Risultato	17
5.4	Modello PRISM: Sistema CON Contromisure	18
5.4.1	Struttura del Modello	18
	Dichiarazione del Tipo di Modello	18
	Variabili di Stato del Sensore E1 (con Active Defense)	18
	Altri Sensori e Contatore Temporale	18
5.4.2	Matrice di Transizione: Sistema CON Contromisure	19
5.4.3	Logica delle Transizioni: Active Defense	19
	CASO 1: Sensore Normale (OK, Non Bloccato)	19

	CASO 2: System Lock (Dopo 3 Tentativi)	20
	CASO 3: Stato Locked (Bloccato - Safe)	20
	CASO 4: Sensore Guasto (FAILED)	20
	CASO 5: COMPROMISED (Stato Teorico Irraggiungibile)	21
5.4.4	Formule Derivate	21
5.5	Proprietà PCTL Verificate: Sistema CON Contromisure	21
5.5.1	Proprietà di Safety (S1)	21
	Codice PCTL	21
	Spiegazione della Formula	21
	Interpretazione	21
	Risultato PRISM	21
	Analisi del Risultato	22
5.5.2	Proprietà di Guarantee/Response (G1)	22
	Codice PCTL	22
	Spiegazione della Formula	22
	Interpretazione	22
	Risultato PRISM	22
	Analisi del Risultato	22
5.5.3	Proprietà di Active Defense Verification	22
	Codice PCTL	22
	Spiegazione della Formula	23
	Interpretazione	23
	Analisi	23
5.6	Confronto Quantitativo: Con vs Senza Contromisure	23
5.6.1	Confronto delle Matrici di Transizione	23
5.6.2	Tabella Comparativa dei Risultati PRISM	24
5.6.3	Analisi delle Differenze	24
	Safety: Impatto delle Contromisure Anti-Attacco	24
	Guarantee/Response: Impatto dell'Auto-Failover	24
5.6.4	Spazio degli Stati	25
5.7	Conclusioni Analisi Formale	25
5.7.1	Efficacia delle Contromisure	25
5.7.2	Validità del Modello	25
5.7.3	Limitazioni e Assunzioni	26
5.8	Testing su Blockchain Privata (Besu)	26
5.8.1	Ambienti di Test	26
5.8.2	Simulazione con Oracolo Scriptato	26
5.8.3	Risultati	27
6	Analisi della Qualità del Codice (Solhint)	28
6.1	Introduzione	28
6.2	Metodologia	28
6.2.1	Solhint: Caratteristiche	28
6.2.2	Installazione ed Esecuzione	28
6.3	Risultati Iniziali	29
6.4	Processo di Ottimizzazione	29
6.4.1	Fase 1: Miglioramenti al Codice (-56 warning)	29
	Documentazione NatSpec (31 warning)	29
	Ottimizzazioni Gas (3 warning)	29
	Refactoring Funzioni (2 warning)	30
6.4.2	Fase 2: Configurazione Naming (-42 warning)	30

6.4.3	Fase 3: Configurazione Gas (-18 warning)	30
6.5	Configurazione Finale	30
6.6	Risultati Finali	31
6.6.1	Metriche Quantitative	31
6.6.2	Warning Rimanenti	31
6.7	Considerazioni Critiche	32
6.8	Conclusioni	32
6.8.1	Raccomandazioni	32
7	Conclusioni e Sviluppi Futuri	33
7.1	Sintesi dei Risultati	33
7.2	Limitazioni Attuali	33
7.3	Sviluppi Futuri	34
7.3.1	Integrazione zk-SNARKs (Privacy)	34
7.3.2	Oracle Feed decentralizzati (Chainlink)	34
7.3.3	Hardware Security Module (HSM)	34
A	Guida al Deployment e Management	35
A.1	Requisiti di Sistema (Prerequisiti)	35
A.2	Installazione e Setup	35
A.2.1	Clonazione del Repository	35
A.2.2	Installazione Dipendenze	35
A.3	Avvio della Rete Blockchain	36
A.3.1	Modalità Sviluppo (Ganache)	36
A.3.2	Modalità Produzione (Hyperledger Besu)	36
A.4	Esecuzione degli Script di Simulazione	36
A.5	Interfaccia Web	36

La gestione della catena del freddo (Pharmaceutical Cold Chain) rappresenta una delle sfide più critiche nel settore logistico sanitario. Il trasporto di farmaci termosensibili, come vaccini e insulina, richiede il mantenimento rigoroso di specifici range di temperatura (tipicamente 2°C - 8°C) lungo l'intera filiera. Deviazioni anche minime possono compromettere l'efficacia del prodotto, con conseguenze potenzialmente letali per i pazienti e ingenti danni economici per le aziende.

Attualmente, la trasparenza di questo processo è limitata dall'uso di sistemi centralizzati e trust-based, dove le informazioni sono spesso frammentate, cartacee o custodite in silos informatici proprietari. Questo scenario rende difficile ricostruire con certezza la "storia termica" di un lotto e lascia spazio a possibili manipolazioni dei dati per coprire errori logistici o negligenze.

In questo contesto, la tecnologia Blockchain offre un cambio di paradigma fondamentale, passando dalla "fiducia negli attori" alla "fiducia nel protocollo". Attraverso un registro distribuito, immutabile e trasparente, è possibile garantire che ogni misurazione registrata sia autentica e non repudiabile. Tuttavia, la blockchain da sola non può verificare la veridicità del dato fisico prima che venga scritto ("Garbage In, Garbage Out").

Questo progetto propone una soluzione ibrida che integra Hyperledger Besu, una blockchain permissioned adatta a contesti enterprise, con un sistema di ****Oracoli Bayesiani****. L'approccio innovativo risiede nell'utilizzare l'inferenza probabilistica on-chain per validare la coerenza delle letture multisensoriali (temperatura, umidità, shock, luce, integrità sigillo) prima di finalizzare la transazione di consegna. In questo modo, il sistema non si limita a registrare i dati, ma agisce come un decisore autonomo capace di accettare o rifiutare un lotto in base a politiche di rischio matematicamente definite.

Questa tesi illustra il design, l'implementazione e la verifica di tale architettura sicura, mettendo in luce come l'integrazione tra DLT (Distributed Ledger Technology) e metodi formali possa elevare gli standard di sicurezza e affidabilità nella logistica farmaceutica 4.0.

In questo capitolo viene analizzato il dominio della Pharmaceutical Cold Chain, evidenziando le criticità di sicurezza attuali. Vengono quindi definiti gli obiettivi del progetto: automazione fidata, integrità dei dati e resilienza agli attacchi.

1.1 Il problema della Catena del Freddo

La spedizione di medicinali sensibili è un processo ad alto rischio. Secondo l'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS), una percentuale significativa di vaccini viene sprecata ogni anno a causa di interruzioni nella catena del freddo. I problemi principali sono:

- **Mancanza di visibilità end-to-end:** I dati di transito sono spesso disponibili solo a posteriori.
- **Conflitto di interessi:** Il trasportatore, responsabile del mantenimento della temperatura, è spesso anche colui che fornisce i dati di monitoraggio, creando un incentivo alla manipolazione in caso di guasti.
- **Silos informativi:** Produttori, distributori e farmacie utilizzano sistemi ERP diversi che non comunicano in tempo reale.

1.2 Obiettivi del Progetto

Il sistema proposto mira a risolvere queste problematiche attraverso tre pilastri fondamentali:

1.2.1 1. Automazione tramite Smart Contract

Eliminare l'intermediazione umana e burocratica nei processi di verifica e pagamento. Il contratto intelligente (Smart Contract) agisce come un deposito a garanzia (Escrow), sbloccando i fondi al corriere solo se tutte le condizioni di qualità sono matematicamente soddisfatte.

Analisi e Progettazione Architeturale

Questo capitolo dettaglia le scelte architettrali adottate per soddisfare i requisiti di sicurezza. Si analizzano le tecnologie selezionate (Hyperledger Besu, Truffle), il design del sistema distribuito e l'architettura a tre livelli (Blockchain, Oracle Middleware, Web UI).

2.1 Architettura Distribuita a Tre Livelli

Il sistema è basato su un'architettura decentralizzata che interagisce con componenti off-chain per garantire usabilità e connessione con il mondo fisico.

2.1.1 Livello Blockchain (Data & Logic Layer)

Il cuore del sistema è una rete privata basata su **Hyperledger Besu**.

- **Ruolo:** Mantiene il registro immutabile delle transazioni (Ledger) e ospita la logica di business (Smart Contracts).
- **Componenti:** Nodi validatori, Smart Contract `BNCore`, `BNGestoreSpedizioni` e `BNPagamenti`.

2.1.2 Livello Middleware (Oracle Layer)

Poiché la blockchain è un sistema chiuso che non può accedere a dati esterni (internet/-sensori), è necessario un componente "ponte".

- **Componente:** `Script Node.js simula_oracolo.js`.
- **Funzione:** Questo script agisce da bridge. Simula l'acquisizione dati dai sensori IoT (Temperatura, Umidità, Shock, Luce, Sigillo), esegue una pre-validazione opzionale e invia le "evidenze" allo Smart Contract tramite transazioni firmate dal `RUOLO_SENSORE`.

2.1.3 Livello Presentazione (Web Interface)

L'interfaccia utente permette agli attori umani di interagire col sistema senza dover usare riga di comando.

- **Tecnologia:** Single Page Application (SPA) HTML5/JS connessa via Web3.js.

- **Ruolo:** Dashboard per la creazione spedizioni, monitoraggio real-time e gestione rimborsi.

2.2 Focus Tecnologico: Hyperledger Besu

La scelta di Hyperledger Besu rispetto ad altre soluzioni (es. Geth, Hyperledger Fabric) è stata guidata da specifici requisiti di sicurezza enterprise.

2.2.1 Consenso IBFT 2.0 (Istanbul Byzantine Fault Tolerance)

A differenza del Proof-of-Work (costoso e lento) o Proof-of-Authority semplice, IBFT 2.0 offre:

- **Finalità Immediata:** Una volta che un blocco è scritto, non può essere riorganizzato (niente "fork"). Questo è critico per la supply chain: una consegna registrata non può "sparire".
- **Tolleranza ai Guasti Bizantini:** Il sistema continua a funzionare correttamente anche se fino a f nodi su N sono malevoli o offline, dove $N \geq 3f + 1$. Nella nostra configurazione a 4 nodi, il sistema resiste alla compromissione completa di 1 nodo validatore senza perdere integrità o disponibilità.

2.2.2 Permissioning Avanzato

Besu permette di definire una "Allowlist" di nodi e account a livello di protocollo.

- **Node Whitelisting:** Solo i nodi certificati (es. appartenenti a Produttore e Distributore) possono partecipare al consenso e sincronizzare la blockchain.
- **Smart Contract Permissions:** L'accesso alle funzioni critiche è limitato a livello applicativo (tramite libreria AccessControl di OpenZeppelin), distinguendo ruoli come ADMIN, MITTENTE e SENSORE.

2.3 Principi di Design Sicuro (Saltzer & Schroeder)

L'architettura rispetta i principi fondamentali della sicurezza:

- **Economy of Mechanism (Semplicità):** I contratti sono modulari. BNCore fa solo matematica, BNGestore gestisce i processi. Meno codice = meno bug.
- **Open Design:** La sicurezza non si basa sull'oscurità. Il codice è pubblico e verificabile; la sicurezza deriva dalla crittografia e dalla matematica del consenso.
- **Fail-Safe Defaults:** Se una condizione non è verificata (es. evidenze mancanti), lo stato di default è "Blocco dei fondi" o "Rifiuto transazione", mai "Accettazione implicita".
- **Separation of Privilege:** Per sbloccare un pagamento servono due condizioni distinte: l'invio delle evidenze (dal Sensore) e la verifica probabilistica (dal Contratto). Nessun singolo attore ha il potere totale.

2.4 Analisi di Resistenza, Sopravvivenza e Ambiguità

- **Resistenza:** L'uso di crittografia asimmetrica rende impossibile la falsificazione delle firme digitali dei sensori.
- **Sopravvivenza (Resilienza):** La natura distribuita del ledger assicura che i dati siano replicati su tutti i nodi. Un attacco DDoS verso un singolo nodo non ferma il servizio.
- **Ambiguità (Obfuscation/Privacy):** Il sistema adotta un approccio ibrido "Privacy by Design".
 - *Logica Pubblica:* I calcoli probabilistici sono trasparenti per garantire l'audit.
 - *Dati Sensibili Offuscati:* I dettagli personali (nomi, lotti farmaceutici) non sono salvati in chiaro on-chain. Viene memorizzato solo un **Hash crittografico** ('hashedDetails') che permette la verifica di integrità senza rivelare il contenuto a osservatori non autorizzati (Off-chain Data Storage).

Valutazione del Rischio e Threat Modeling

In questo capitolo viene presentata un'analisi approfondita della sicurezza del sistema, condotta attraverso metodologie formali e strutturate. L'analisi inizia con la modellazione degli obiettivi e delle dipendenze strategiche tramite framework **i* (iStar)**, prosegue con la valutazione delle minacce mediante approccio **DUAL-STRIDE** esteso agli asset dell'attore sistema, e si conclude con la definizione di scenari di **Abuse e Misuse Cases**.

3.1 Modellazione i* (iStar)

Per comprendere appieno il contesto organizzativo e tecnico, sono stati realizzati diversi modelli i*, che evidenziano attori, obiettivi (Goals), compiti (Tasks) e risorse (Resources).

3.1.1 Supply Chain As-Is (Senza Sistema)

Il primo modello Strategic Dependency (SD) rappresenta la supply chain tradizionale.

- **Attori:** Produttore, Distributore, Farmacia, Paziente.
- **Criticità:** L'analisi SR (Strategic Rationale) evidenzia dipendenze di "fiducia cieca" tra gli attori riguardo l'integrità della temperatura. Il Produttore dipende dal Distributore per la corretta conservazione, ma non ha mezzi diretti di verifica (Softgoal "Integrità non verificabile").

3.1.2 Supply Chain To-Be (Con Sistema Blockchain)

L'introduzione del sistema introduce nuove dipendenze strategiche più robuste.

- **Nuovi Attori:** Sistema Smart Contract, Oracolo IoT.
- **Vantaggi:** Il Softgoal "Integrità Verificabile" è ora soddisfatto dalla risorsa "Registro Immutabile" fornita dal sistema. Gli attori umani dipendono dal Sistema per la validazione, non più dalla fiducia reciproca.

3.1.3 Sistema e Attaccanti

Sono stati modellati tre profili di attaccante interagenti con il sistema:

1. **Attaccante Interno (Malicious Insider):** Un operatore logistico corrotto che tenta di manipolare i sensori fisici.
2. **Attaccante Esterno:** Un hacker remoto che tenta attacchi di rete (DoS, intercettazione) o exploit sugli Smart Contract.
3. **Utente Maldestro (Clumsy User):** Un operatore che commette errori non intenzionali (es. perdita chiavi private, input errati).

Per ciascun attaccante, i diagrammi SR includono **Alberi di Attacco (Attack Trees)** integrati, che mostrano la decomposizione degli obiettivi malevoli (es. "Falsificare Report Temperatura") in sotto-task operativi.

3.2 Analisi DUAL-STRIDE

L'analisi delle minacce è stata condotta metodicamente raggruppando gli asset secondo il paradigma DUAL-STRIDE, focalizzandosi specificamente sugli asset dell'**Attore Sistema**.

3.2.1 Identificazione degli Asset

Gli asset primari analizzati sono:

- **Smart Contract (Logica):** Codice Solidity distribuito.
- **Dati della Blockchain (Ledger):** Storico transazioni e stati.
- **Credenziali (Chiavi Private):** Chiavi dei nodi validatori e degli utenti.
- **Oracolo (Infrastruttura IoT):** Ponte tra mondo fisico e digitale.

3.2.2 Matrice delle Minacce (Riferimenti CAPEC/ATT&CK)

Per ogni categoria STRIDE sono stati identificati vettori di attacco specifici, mappati sui framework standard CAPEC e MITRE ATT&CK.

STRIDE	Minaccia Identificata	Rif. CAPEC
Spoofing	Impersonificazione di un nodo validatore	CAPEC-151 (Identity Spoofing)
Tampering	Modifica dati sensore pre-invio (Data Injection)	CAPEC-155 (Screen/Data Capture)
Repudiation	Negazione di avvenuta consegna del lotto	CAPEC-390 (Bypassing Checks)
Information Disc.	Lettura transazioni private (Analisi traffico)	CAPEC-118 (Traffic Analysis)
Denial of Service	Spam di transazioni per bloccare la rete	CAPEC-488 (HTTP Flood/Gas Limit)
Elevation of Priv.	Sfruttamento bug in AccessControl	CAPEC-233 (Privilege Escalation)

Tabella 3.1: Analisi STRIDE sugli Asset del Sistema

3.3 Abuse e Misuse Cases

Per completare l'analisi, sono stati definiti scenari operativi di abuso per ogni asset critico.

3.3.1 Abuse Case: Iniezione Dati Falsi (Attaccante Interno)

- **Attore:** Insider Logistico.
- **Obiettivo:** Nascondere un'escursione termica per evitare penali.
- **Asset:** Oracolo IoT.
- **Scenario:** L'attaccante manomette fisicamente il sensore o inietta pacchetti MQTT falsificati verso l'Oracolo.
- **Mitigazione:** Validazione Bayesiana per rilevare incongruenze statistiche (v. Cap. 4).

3.3.2 Misuse Case: Smarrimento Chiave Privata (Utente Maldestro)

- **Attore:** Farmacista.
- **Evento:** L'utente cancella accidentalmente il file keystore o lo condivide su canali non sicuri.
- **Conseguenza:** Perdita di accesso ai fondi o furto d'identità.
- **Mitigazione:** Procedure di key-recovery off-chain (non implementate on-chain per scelta di design) e formazione operativa.

Programmazione Sicura e Dettagli Implementativi

In questo capitolo viene analizzata nel dettaglio l'implementazione del sistema, coprendo l'intero stack: dai Smart Contract Solidity, passando per la logica di simulazione Oracle, fino all'Interfaccia Web utente.

4.1 Smart Contract e Logica On-Chain

Il backend decentralizzato è costituito dai contratti `BNCore` e `BNGestoreSpedizioni`, che implementano la logica di business e di sicurezza.

4.1.1 BNCore: Il Motore Inferenziale

Il contratto `BNCore` agisce come "cervello" matematico. Implementa una Rete Bayesiana statica dove:

- **Fatti (Nodi Root):** F_1 (Temperatura Conforme), F_2 (Integrità Fisica).
- **Evidenze (Nodi Foglia):** $E_1 \dots E_5$ (letture sensori).

Poiché Solidity non gestisce i float, le probabilità sono gestite come interi (base 100). Il calcolo della probabilità combinata avviene *on-chain* per garantire trasparenza: tutti possono verificare perché una spedizione è stata accettata o rifiutata.

4.1.2 BNGestoreSpedizioni: Sicurezza Operativa

Gestisce il ciclo di vita... (come sopra). [...existing code listing...]

4.1.3 BNPagamenti: L'Attuatore Finanziario

Questo contratto estende `BNGestoreSpedizioni` per isolare la logica critica di pagamento.

- **Responsabilità:** Esegue la funzione `validaEPaga()`, che incrocia i dati del ledger con le probabilità calcolate da `BNCore`.
- **Sicurezza:** Implementa `ReentrancyGuard` per prevenire attacchi durante il trasferimento di Ether.

```

1 function validaEPaga(uint256 _id) external nonReentrant {
2     // ... checks ...
3     (uint256 pF1, uint256 pF2) = _calcolaProbabilitaPosteriori(s.evidenze);
4
5     // SAFETY MONITOR S4: Probability Threshold
6     if (pF1 < SOGLIA || pF2 < SOGLIA) {
7         emit MonitorSafetyViolation("Threshold", _id, msg.sender, "Non conforme");
8         emit TentativoPagamentoFallito(_id, ...);
9         return; // Fail-safe: non paga
10    }
11
12    // GUARANTEE MONITOR G1: Payment Success
13    s.stato = StatoSpedizione.Pagata;
14    (bool success, ) = s.corriere.call{value: s.importoPagamento}("");
15    require(success, "Transfer fallito");
16    emit MonitorGuaranteeSuccess("PaymentExecuted", _id);
17 }

```

Listing 4.1: Runtime Monitor in BNPagamenti (validaEPaga)

4.1.4 Privacy e Offuscamento Dati

Per mitigare la trasparenza totale della blockchain pubblica, è stato implementato un pattern di **On-Chain Hashing**. I dati sensibili (es. farmaco, destinazione) non vengono salvati sullo Smart Contract.

1. Il mittente calcola $H = \text{Keccak256}(\text{JSON Dettagli})$ off-chain.
2. Invoca `creaSpedizioneConHash(..., H)`.
3. Solo chi possiede il JSON originale può verificare la corrispondenza chiamando `verificaDettagli(JSON)`.

4.2 Sistema Oracolo e Simulazione IoT

Il ponte tra mondo fisico e blockchain è gestito dallo script `simula_oracolo.js`. Questo componente è fondamentale perché la blockchain non può interrogare direttamente i sensori.

4.2.1 Flow del Dato (Sensore → Blockchain)

1. **Generazione:** Lo script genera valori casuali per i 5 sensori (Temperatura, Umidità, Shock, Luce, Sigillo), simulando scenari normali (90% probabilità) o di guasto.
2. **Firma:** Ogni lettura viene impacchettata in una transazione firmata dalla chiave privata del RUOLO_SENSORE.
3. **Invio:** Le transazioni invocano `inviaEvidenza(id, tipo, valore)` sullo smart contract.

```

1 // Logica simulata: il 'sensore' rileva valori corretti casualmente
2 function simulaSensore() { return Math.random() < 0.9; }
3
4 // Loop di invio evidenze
5 const El_Temp = simulaSensore();
6 await contratto.methods.inviaEvidenza(id, 1, El_Temp)
7   .send({ from: indirizzoSensore }); // Firma crittografica

```

Listing 4.2: Simulazione IoT e Invio dati (simula_oracolo.js)

4.3 Interfaccia Web (Dashboard Utente)

L'interazione umana avviene tramite una DApp (Decentralized App) Web, progettata per offrire esperienze diverse in base al ruolo dell'utente connesso (rilevato tramite MetaMask).

4.3.1 Ruolo: Mittente (Sender)

Il Mittente (es. casa farmaceutica) è l'iniziatore del processo.

- **Nuova Spedizione:** Compila un form indicando l'indirizzo Ethereum del corriere e l'importo da bloccare in deposito (Escrow).
- **Operazione:** Al click su "Crea", Web3.js apre MetaMask per confermare la transazione e depositare gli Ether.
- **Monitoraggio:** Visualizza una lista delle proprie spedizioni con stato in tempo reale (In Transito, Consegnata, Rimborsata).

4.3.2 Ruolo: Corriere (Carrier)

Il trasportatore ha accesso in "sola lettura" operativa ma con interesse economico.

- **Tracking:** Visualizza le spedizioni a lui assegnate.
- **Notifiche:** Riceve aggiornamenti sullo stato delle evidenze caricate dai sensori.
- **Incasso:** Se la validazione Bayesiana ha successo, vede lo sblocco automatico dei fondi sul proprio wallet.

4.3.3 Ruolo: Admin/Sensore (IoT Simulator)

Nella demo, l'interfaccia permette anche di "triggerare" manualmente l'invio delle evidenze (funzione di debug) per vedere come reagisce il contratto.

- **Pannello Sensori:** Visualizza toggle switch per ogni sensore (E1-E5).
- **Invio Forzato:** Permette di inviare una configurazione specifica (es. "Tutto OK tranne Temperatura") per testare la robustezza della validazione.

4.4 Integrazione Web3 e Gestione Eventi

Il frontend non fa polling continuo ma reagisce agli **Eventi** emessi dallo Smart Contract. Quando BNCore emette l'evento `ProbabilitaValidazione`, l'interfaccia aggiorna immediatamente i grafici e lo stato, offrendo un'esperienza reattiva.

```
1 contratto.events.EvidenceReceived()
2   .on('data', function(event) {
3     console.log("Nuova evidenza ricevuta:", event.returnValues);
4     updateUIProgressBar(event.returnValues.shipmentId);
5   });
```

Listing 4.3: Ascolto Eventi in Web3.js

Verifica, Validazione e Modellazione Formale

In questo capitolo vengono esposti i risultati delle attività di verifica e validazione. La prima parte presenta la modellazione formale esaustiva del sistema tramite Catene di Markov (PRISM), analizzando nel dettaglio le logiche di transizione, le proprietà verificate e l'impatto quantitativo delle contromisure. La seconda parte descrive i test funzionali eseguiti sulla rete Hyperledger Besu.

5.1 Introduzione: Obiettivo della Modellazione

5.1.1 Contesto del Sistema

Il sistema oggetto di questa analisi è un sistema di monitoraggio IoT per la supply chain composto da cinque sensori critici che monitorano lo stato di merci durante il trasporto. L'architettura del sistema comprende il sensore E1 per il monitoraggio della temperatura, il sensore E2 per il controllo del sigillo, il sensore E3 per il rilevamento degli shock meccanici, il sensore E4 per il monitoraggio della luce, e il sensore E5 per la scansione all'arrivo. Questi componenti sono stati progettati per garantire l'integrità e la tracciabilità dei dati durante l'intera catena logistica.

5.1.2 Scopo dell'Analisi di Markov Chain

L'obiettivo di questa analisi è modellare formalmente il comportamento probabilistico del sistema di sensori utilizzando Discrete-Time Markov Chains (DTMC). L'approccio metodologico persegue tre obiettivi principali: quantificare l'efficacia delle contromisure di sicurezza implementate attraverso l'analisi DUAL-STRIDE, verificare formalmente proprietà di Safety e Guarantee/Response utilizzando il model checker PRISM, e confrontare quantitativamente il sistema con e senza contromisure per dimostrare l'impatto delle misure di sicurezza adottate.

5.1.3 Minacce Modellate

L'analisi DUAL-STRIDE ha identificato come critiche per l'integrità del sistema due principali minacce appartenenti alla tassonomia STRIDE. La prima è Spoofing (S2.1), in cui un sensore falso può iniettare dati malevoli nel sistema compromettendone l'autenticità. La seconda è Tampering (T2.1), che consiste nella manomissione fisica dei sensori con conseguente alterazione delle letture. Tali minacce rappresentano vettori di attacco significativi che possono compromettere la confidenzialità e l'integrità dei dati raccolti.

5.1.4 Contromisure Implementate

Il sistema di sicurezza implementato si basa su tre pilastri fondamentali. Il primo consiste in Device Attestation basato su Trusted Platform Module (TPM) combinato con Mutual TLS, che fornisce autenticazione bilaterale e blocca efficacemente attacchi di tipo Spoofing. Il secondo pilastro è rappresentato dalla Sensor Redundancy, che mitiga i rischi derivanti da Tampering fisico mediante ridondanza hardware. Il terzo pilastro è costituito dall'Active Defense System, un sistema di difesa attivo composto da tre componenti: Intrusion Detection System (IDS) per il rilevamento dei tentativi di attacco, Rate Limiting per il conteggio dei fallimenti di autenticazione, e System Lock che blocca permanentemente il sensore dopo tre tentativi di attacco consecutivi.

5.2 Modello PRISM: Sistema SENZA Contromisure

5.2.1 Struttura del Modello

Il modello PRISM rappresenta il sistema prima dell'implementazione delle contromisure DUAL-STRIDE, evidenziando la vulnerabilità intrinseca agli attacchi. Il modello è dichiarato come Discrete-Time Markov Chain (DTMC), in cui il tempo avanza in step discreti e le transizioni tra stati seguono distribuzioni probabilistiche definite.

Dichiarazione del Tipo di Modello

```
1 dtmc
```

Questa dichiarazione specifica che il modello adotta una Discrete-Time Markov Chain (DTMC), dove il tempo avanza in step discreti e le transizioni sono governate da probabilità.

Variabili di Stato (Senza Active Defense)

```
1 module sensor_system_vulnerable
2
3   e1 : [0..2] init 0; // Sensore E1: Temperatura
4   e2 : [0..2] init 0; // Sensore E2: Sigillo
5   e3 : [0..2] init 0; // Sensore E3: Shock
6   e4 : [0..2] init 0; // Sensore E4: Luce
7   e5 : [0..2] init 0; // Sensore E5: Scan Arrivo
8
9   time : [0..200] init 0;
```

Ogni sensore è modellato attraverso una variabile di stato con dominio $[0..2]$, dove lo stato 0 corrisponde al sensore funzionante e sicuro (OK), lo stato 1 rappresenta un guasto hardware non derivante da compromissione (FAILED), e lo stato 2 indica un sensore sotto attacco riuscito (COMPROMISED). Il modello include inoltre un contatore temporale che avanza da 0 a 200 step, definendo l'orizzonte temporale dell'analisi.

Una caratteristica distintiva di questo modello vulnerabile è l'assenza del contatore `e1_attempts` e del flag `e1_locked`, indicando che non sono implementati meccanismi di IDS, Rate Limiting o Active Defense. Tutti i sensori inizializzano nello stato OK (`init 0`) per consentire un confronto equo con il modello protetto.

5.2.2 Matrice di Transizione: Sistema SENZA Contromisure

La seguente matrice mostra le probabilità di transizione per un singolo sensore senza contromisure:

Da Stato ↓ / A Stato →	OK (0)	FAILED (1)	COMPROMISED (2)
OK (0)	0.80	0.05	0.15
FAILED (1)	0.60	0.30	0.10
COMPROMISED (2)	0.00	0.00	1.00

Tabella 5.1: Matrice di Transizione - Sistema Vulnerabile

Dallo stato OK, il sensore ha una probabilità dell'80% di rimanere operativo in assenza di eventi, una probabilità del 5% di transizione verso lo stato FAILED dovuta a guasti hardware naturali, e una probabilità critica del 15% di transizione verso lo stato COMPROMISED, dovuta ad attacchi riusciti (Spoofing 5% + Tampering 10%). Dallo stato FAILED, il recovery manuale presenta una probabilità del 60%, mentre vi è una probabilità del 30% che il sensore rimanga guasto e una preoccupante probabilità del 10% di compromissione, indicando una maggiore vulnerabilità dei sensori in stato di guasto. Lo stato COMPROMISED costituisce uno stato assorbente con probabilità unitaria di autoreferenzialità, implicando l'impossibilità di recovery una volta raggiunto tale stato.

Le osservazioni critiche evidenziano un'alta probabilità di compromissione (15% da OK e 10% da FAILED), la natura assorbente dello stato compromesso che impedisce qualsiasi forma di recupero, e un recovery lento caratterizzato da una probabilità di solo 60% dalla condizione di guasto.

Diagramma di Stati: Sistema SENZA Contromisure La struttura a stati del modello vulnerabile si configura come segue:

- **OK:** Stato iniziale operativo. È vulnerabile agli attacchi (15% probabilità di transizione a COMPROMISED).
- **FAILED:** Stato di guasto hardware. È ancora più vulnerabile (10% di attacco su sensore guasto) e ha un recovery lento (60%).
- **COMPROMISED:** Stato assorbente. Una volta raggiunto (da OK o FAILED), il sistema non può più uscirne (loop 100%).

5.2.3 Logica delle Transizioni: Sistema Vulnerabile

Sensore OK → OK, FAILED, o COMPROMISED

```

1  [] e1=0 & time<200 ->
2      0.80 : (e1'=0) & (time'=time+1) +      // Rimane OK
3      0.05 : (e1'=1) & (time'=time+1) +      // Guasto naturale
4      0.15 : (e1'=2) & (time'=time+1);      // ATTACCO RIUSCITO

```

Questa regola di transizione codifica tre possibili esiti per un sensore nello stato OK. Con probabilità 80% il sensore rimane operativo, con probabilità 5% si verifica un guasto hardware naturale, e con probabilità 15% si verifica un attacco riuscito che porta il sensore allo stato COMPROMISED. Quest'ultima transizione rappresenta il punto critico del sistema vulnerabile, in quanto senza contromisure di sicurezza, gli attacchi di Spoofing (5%) e Tampering (10%) hanno successo con probabilità significativa, trasferendo il sensore in uno stato dal quale non può recuperare.

Sensore FAILED → OK, FAILED, o COMPROMISED

```

1  [] e1=1 & time<200 ->
2    0.60 : (e1'=0) & (time'=time+1) +      // Recovery manuale
3    0.30 : (e1'=1) & (time'=time+1) +      // Rimane guasto
4    0.10 : (e1'=2) & (time'=time+1);      // ATTACCO (piu' vulnerabile)

```

Per un sensore in stato FAILED, la regola modella il processo di recovery manuale che, in assenza di meccanismi di Auto-Failover, presenta un tasso di successo del 60%, inferiore rispetto al modello protetto. La probabilità del 30% di permanenza nello stato guasto e del 10% di compromissione evidenzia la maggiore vulnerabilità dei sensori non operativi, confermando che i dispositivi in condizione di guasto rappresentano target più favorevoli per gli attaccanti.

Sensore COMPROMISED → COMPROMISED (Stato Assorbente)

```

1  [] e1=2 & time<200 ->
2    1.00 : (e1'=2) & (time'=time+1);      // Rimane compromesso

```

Lo stato COMPROMISED è modellato come stato assorbente mediante una probabilità unitaria di auto-transizione. Una volta compromesso, il sensore non può essere recuperato e il sistema rimane permanentemente in uno stato insicuro, rappresentando una condizione irreversibile che compromette definitivamente l'integrità del sistema di monitoraggio.

5.2.4 Formule Derivate

```

1 formula num_ok = (e1=0?1:0) + (e2=0?1:0) + (e3=0?1:0) + (e4=0?1:0) + (e5=0?1:0);
2 formula num_failed = (e1=1?1:0) + (e2=1?1:0) + (e3=1?1:0) + (e4=1?1:0) + (e5=1?1:0);
3 formula num_compromised = (e1=2?1:0) + (e2=2?1:0) + (e3=2?1:0) + (e4=2?1:0) + (e5=2?1:0);
4
5 formula is_system_compromised = (num_compromised >= 1);
6 formula is_system_operational = (num_ok = 5);
7 formula is_system_degraded = (num_failed >= 1) & !is_system_compromised;
8 formula is_safe = !is_system_compromised;

```

Il modello definisce formule ausiliarie per classificare lo stato aggregato del sistema. Le formule `num_ok`, `num_failed` e `num_compromised` contano il numero di sensori in ciascuno stato, mentre le formule derivate `is_system_compromised`, `is_system_operational`, `is_system_degraded` e `is_safe` definiscono predicati booleani per classificare lo stato complessivo. In particolare, il sistema è considerato compromesso se almeno un sensore si trova nello stato COMPROMISED, riflettendo l'assenza di Sensor Redundancy nel modello vulnerabile.

5.3 Proprietà PCTL Verificate: Sistema SENZA Contromisure**5.3.1 Proprietà di Safety (S1)****Codice PCTL**

```

1 P=? [ G<=100 (e1!=2 & e2!=2 & e3!=2 & e4!=2 & e5!=2) ]

```

Spiegazione della Formula

La proprietà utilizza l'operatore `P=?` per calcolare la probabilità, l'operatore temporale `G<=100` (Globally) per verificare che la condizione sia soddisfatta per tutti gli step temporali da 0 a 100, e la condizione booleana che verifica che nessun sensore si trovi nello stato COMPROMISED (stato 2).

Interpretazione

La proprietà risponde alla domanda: "Qual è la probabilità che nessun sensore venga mai compromesso nei primi 100 step?"

Risultato PRISM

Risultato: $1.48771908015099 \times 10^{-7} \approx 0.0000149\%$

Analisi del Risultato

Il risultato della verifica PRISM evidenzia la vulnerabilità critica del sistema non protetto. La probabilità che il sistema non venga compromesso in 100 step è praticamente nulla (0.0000149%), indicando che con cinque sensori e una probabilità di attacco del 15% per step, il sistema viene compromesso quasi certamente in pochi step temporali.

L'analisi probabilistica conferma questo risultato attraverso il seguente ragionamento. La probabilità che un singolo sensore non venga compromesso in un singolo step è 85%, quindi la probabilità che tutti e cinque i sensori rimangano sicuri in un singolo step è $(0.85)^5 \approx 44.37\%$. Estendendo questo calcolo su 100 step si ottiene $(0.4437)^{100}$, un valore che tende asintoticamente a zero, confermando la quasi certezza della compromissione del sistema nell'arco temporale considerato.

5.3.2 Proprietà di Guarantee/Response (G1)

Codice PCTL

```
1 P=? [ F<=20 (e1=0 & e2=0 & e3=0 & e4=0 & e5=0) ]
```

Spiegazione della Formula

La proprietà utilizza l'operatore $F \leq 20$ (Finally) per verificare che entro 20 step la condizione sia eventualmente soddisfatta, verificando che tutti i sensori tornino allo stato OK (stato 0).

Interpretazione

La proprietà risponde alla domanda: "Partendo da uno stato con alcuni sensori guasti o compromessi, qual è la probabilità che tutti i sensori tornino OK entro 20 step?"

Risultato PRISM

Risultato: $0.435146013503529 \approx 43.5\%$

Analisi del Risultato

Il risultato evidenzia significative limitazioni nel processo di recovery del sistema vulnerabile. In assenza di meccanismi di Auto-Failover, il recovery è manuale e lento, con un tasso di successo per step di solo 60%. Inoltre, la presenza dello stato assorbente COMPROMISED rende impossibile il recovery completo se anche un solo sensore viene compromesso durante il periodo di osservazione, riducendo ulteriormente la probabilità di ritorno allo stato pienamente operativo.

5.4 Modello PRISM: Sistema CON Contromisure

5.4.1 Struttura del Modello

Il modello PRISM rappresenta il sistema con tutte le contromisure di sicurezza attive. A differenza del modello vulnerabile, questo include variabili di stato aggiuntive per implementare l'Active Defense System, fornendo capacità di rilevamento, conteggio e risposta automatica ai tentativi di attacco.

Dichiarazione del Tipo di Modello

```
1 dtmc
```

Analogamente al modello vulnerabile, il sistema protetto adotta una Discrete-Time Markov Chain (DTMC), mantenendo la stessa struttura temporale discreta e le transizioni probabilistiche.

Variabili di Stato del Sensore E1 (con Active Defense)

```
1 module sensor_system_active_defense
2
3   e1 : [0..2] init 1;           // 0=OK, 1=FAILED, 2=COMPROMISED
4   e1_attempts : [0..3] init 0; // Contatore tentativi di attacco
5   e1_locked : bool init false; // Stato di blocco difensivo
```

Per il sensore E1, il modello definisce tre variabili che estendono la rappresentazione base. La variabile `e1` mantiene lo stato operativo con dominio `[0..2]`, rappresentando i tre possibili stati (OK, FAILED, COMPROMISED). La variabile `e1_attempts` con dominio `[0..3]` funge da contatore per i tentativi di attacco rilevati dall'IDS, permettendo di tracciare il numero di attacchi bloccati e di attivare risposte graduate. La variabile `e1_locked` di tipo booleano indica se il sistema ha attivato il blocco di sicurezza, entrando in una modalità di protezione massima dopo ripetuti tentativi di attacco.

Il sensore E1 inizializza nello stato FAILED (`init 1`) per permettere la verifica della proprietà di recovery, mentre i sensori E2-E5 inizializzano nello stato OK. Questa architettura consente di modellare esplicitamente il meccanismo di Active Defense: ogni tentativo di attacco viene rilevato dall'IDS e incrementa il contatore; al raggiungimento di tre tentativi, il sistema attiva automaticamente lo stato LOCKED, entrando in una modalità di protezione massima.

Altri Sensori e Contatore Temporale

```
1   e2 : [0..2] init 0;
2   e3 : [0..2] init 0;
3   e4 : [0..2] init 0;
4   e5 : [0..2] init 0;
5
6   time : [0..200] init 0;
```

I sensori E2-E5 mantengono la stessa struttura di stati di E1, ma per semplicità implementativa non includono esplicitamente le variabili di Active Defense, assumendo che il comportamento di E1 sia rappresentativo del meccanismo di protezione applicabile a tutti i componenti. Il contatore temporale mantiene la stessa finestra di osservazione da 0 a 200 step, garantendo comparabilità con il modello vulnerabile.

5.4.2 Matrice di Transizione: Sistema CON Contromisure

La seguente matrice mostra le probabilità di transizione tra gli stati per un sensore con contromisure attive (semplificando il modello senza considerare esplicitamente lo stato LOCKED):

Da Stato ↓ / A Stato →	OK (0)	FAILED (1)	COMPROMISED (2)
OK (0)	0.90	0.05	0.00
FAILED (1)	0.95	0.05	0.00
COMPROMISED (2)	0.00	0.00	1.00

Tabella 5.2: Matrice di Transizione - Sistema Protetto

Dallo stato OK, il sensore ha una probabilità del 90% di rimanere operativo (incluso sia l'assenza di eventi sia il blocco di attacchi tentati), una probabilità del 5% di guasto hardware naturale, e una probabilità nulla di compromissione. Quest'ultimo valore riflette l'efficacia delle contromisure TPM, Mutual TLS e Sensor Redundancy che bloccano al 100% gli attacchi di Spoofing e Tampering. Dallo stato FAILED, il recovery automatico tramite Auto-Failover presenta un'alta probabilità di successo del 95%, mentre la probabilità di rimanere guasto è ridotta al 5%. Anche in questo stato vulnerabile, le contromisure garantiscono una probabilità nulla di compromissione. Lo stato COMPROMISED, sebbene definito per completezza del modello, è teoricamente irraggiungibile quando le contromisure sono attive, rappresentando una garanzia formale di sicurezza del sistema.

Nel modello completo con Active Defense, dopo tre tentativi di attacco rilevati e bloccati, il sensore transita nello stato LOCKED dove rimane permanentemente in stato OK con probabilità unitaria, implementando un meccanismo di protezione adattiva contro attacchi persistenti.

Diagramma di Stati: Sistema CON Contromisure Il modello protetto introduce nuovi stati e transizioni:

- **OK:** Ora protetto. Gli attacchi vengono BLOCCATI (5%) e incrementano il contatore `attempts`.
- **LOCKED:** Nuovo stato di difesa attiva. Raggiunto dopo 3 attacchi bloccati. È uno stato "blindato" (100% loop su OK).
- **FAILED:** Il recovery è molto più veloce (95% Auto-failover) ed è protetto dagli attacchi (0% transizione a COMPROMISED).
- **COMPROMISED:** Stato teorico, ma irraggiungibile nel grafo delle transizioni.

5.4.3 Logica delle Transizioni: Active Defense

CASO 1: Sensore Normale (OK, Non Bloccato)

```

1  [] e1=0 & !e1_locked & e1_attempts < 3 & time<200 ->
2    0.90 : (e1'=0) & (time'=time+1) +                               // Nessun
    ↪ evento
3    0.05 : (e1'=1) & (time'=time+1) +                               // Guasto
    ↪ naturale
4    0.05 : (e1'=0) & (e1_attempts'=e1_attempts+1) & (time'=time+1); // ATTACCO
    ↪ RILEVATO

```

Questa regola fondamentale del modello protetto si attiva quando il sensore è OK, non è in stato di blocco, il numero di tentativi è inferiore a tre, e il tempo non ha raggiunto il limite. Le tre transizioni probabilistiche codificano scenari distinti: con probabilità 90% nessun evento rilevante si verifica, con probabilità 5% si manifesta un guasto hardware naturale, e con probabilità 5% un attacco viene tentato, rilevato e bloccato.

Quest'ultima transizione è cruciale per comprendere il meccanismo di sicurezza implementato. L'attaccante tenta un attacco con la stessa probabilità del modello vulnerabile (5%), ma l'IDS lo rileva in tempo reale, le contromisure TPM e Mutual TLS lo bloccano completamente impedendo la compromissione, il sensore rimane in stato OK preservando l'integrità del sistema, e il contatore dei tentativi viene incrementato per tracciare l'attività malevola. Questo meccanismo modella esplicitamente il concetto fondamentale che gli attacchi esistono e vengono tentati con la stessa frequenza del modello vulnerabile, ma le contromisure li neutralizzano al 100%, rendendo lo stato COMPROMISED formalmente irraggiungibile.

CASO 2: System Lock (Dopo 3 Tentativi)

```

1  [] e1=0 & !e1_locked & e1_attempts = 3 & time<200 ->
2  1.00 : (e1_locked'=true) & (time'=time+1); // ATTIVA
    ↪ BLOCCO

```

Quando il contatore raggiunge tre tentativi di attacco bloccati, si attiva questa regola di transizione deterministica che porta il sistema nello stato LOCKED con probabilità unitaria. Questo rappresenta il meccanismo di Active Defense: dopo aver rilevato e bloccato tre tentativi consecutivi, il sistema conclude che è sotto attacco persistente e attiva automaticamente una modalità di protezione massima, implementando una risposta adattiva proporzionale alla minaccia osservata.

CASO 3: Stato Locked (Bloccato - Safe)

```

1  [] e1=0 & e1_locked & time<200 ->
2  1.00 : (e1'=0) & (time'=time+1); // Rimane
    ↪ sicuro in Lock

```

Una volta entrato nello stato LOCKED, il sensore esegue questa regola che garantisce con probabilità unitaria che il sensore rimanga sempre in stato OK. In questa modalità di protezione massima, il sensore è "blindato" contro qualsiasi ulteriore tentativo di attacco, implementando una strategia difensiva che previene definitivamente la compromissione anche in presenza di attacchi persistenti e ripetuti.

CASO 4: Sensore Guasto (FAILED)

```

1  [] e1=1 & !e1_locked & time<200 ->
2  0.95 : (e1'=0) & (time'=time+1) + // Auto-
    ↪ failover repair
3  0.05 : (e1'=1) & (time'=time+1); // Rimane
    ↪ guasto

```

Per un sensore in stato FAILED, la regola modella il meccanismo di Auto-Failover basato su Sensor Redundancy. Con un tasso di successo del 95%, significativamente superiore al 60% del modello vulnerabile, il sistema è in grado di recuperare rapidamente dai guasti hardware, minimizzando i periodi di indisponibilità. La probabilità residua del 5% che il failover non riesca riflette scenari realistici in cui la ridondanza hardware può occasionalmente fallire, mantenendo l'onestà del modello senza assumere capacità perfette.

CASO 5: COMPROMISED (Stato Teorico Irraggiungibile)

```

1 [] e1=2 & time<200 ->
2 1.00 : (e1'=2) & (time'=time+1);

```

Lo stato COMPROMISED è modellato come stato assorbente per completezza formale del modello, ma con le contromisure attive questo stato non viene mai raggiunto. La sua presenza nel modello è necessaria per definire completamente lo spazio degli stati e permettere al model checker di verificare formalmente che tale stato è irraggiungibile, fornendo una dimostrazione matematica dell'efficacia delle contromisure implementate.

5.4.4 Formule Derivate

```

1 formula num_ok = (e1=0?1:0) + (e2=0?1:0) + (e3=0?1:0) + (e4=0?1:0) + (e5=0?1:0);
2 formula num_failed = (e1=1?1:0) + (e2=1?1:0) + (e3=1?1:0) + (e4=1?1:0) + (e5=1?1:0);
3 formula num_compromised = (e1=2?1:0) + (e2=2?1:0) + (e3=2?1:0) + (e4=2?1:0) + (e5=2?1:0);
4
5 formula is_system_compromised = (num_compromised >= 1);
6 formula is_operational = (num_ok = 5);
7 formula is_degraded = (num_failed >= 1) & !is_system_compromised;
8 formula is_safe = !is_system_compromised;

```

Le formule ausiliarie del modello protetto mantengono la stessa struttura del modello vulnerabile per garantire comparabilità. Tuttavia, le formule derivate assumono significati profondamente diversi: `is_system_compromised` è sempre falso grazie alle contromisure, `is_operational` riflette l'alta disponibilità garantita dall'Auto-Failover, e `is_safe` è sempre vero, fornendo una garanzia formale di sicurezza verificabile attraverso model checking.

5.5 Proprietà PCTL Verificate: Sistema CON Contromisure

5.5.1 Proprietà di Safety (S1)

Codice PCTL

```

1 P=? [ G<=100 (e1!=2 & e2!=2 & e3!=2 & e4!=2 & e5!=2) ]

```

Spiegazione della Formula

La proprietà di Safety per il sistema protetto è identica nella forma a quella del sistema vulnerabile, utilizzando l'operatore `G<=100` per verificare che globalmente, per tutti gli step da 0 a 100, nessun sensore si trovi nello stato COMPROMISED.

Interpretazione

La proprietà risponde alla stessa domanda del modello vulnerabile: "Qual è la probabilità che nessun sensore venga mai compromesso nei primi 100 step?"

Risultato PRISM

Risultato: 1.0 (100%)

Analisi del Risultato

Il risultato della verifica PRISM costituisce una dimostrazione formale dell'efficacia delle contromisure implementate. La probabilità del 100% di non-compromissione, in contrasto stridente con lo 0.0000149% del sistema vulnerabile, evidenzia tre aspetti fondamentali.

Primo, le contromisure sono efficaci al 100% nel bloccare gli attacchi, eliminando completamente il rischio di compromissione nell'orizzonte temporale considerato. Secondo, sebbene gli attacchi vengano tentati con la stessa probabilità del modello vulnerabile (5% per step, come modellato esplicitamente nella terza transizione della regola principale), le contromisure TPM, Mutual TLS e Sensor Redundancy li bloccano completamente prima che possano causare danni. Terzo, lo stato COMPROMISED è formalmente irraggiungibile nel modello con contromisure, una garanzia verificabile matematicamente attraverso model checking che fornisce certezza assoluta sull'efficacia del sistema di sicurezza.

5.5.2 Proprietà di Guarantee/Response (G1)

Codice PCTL

```
1 P=? [ F<=20 (e1=0 & e2=0 & e3=0 & e4=0 & e5=0) ]
```

Spiegazione della Formula

La proprietà utilizza l'operatore $F \leq 20$ per verificare che entro 20 step tutti i sensori tornino eventualmente allo stato OK, valutando la capacità di recovery del sistema protetto.

Interpretazione

La proprietà risponde alla domanda: "Se il sistema parte con almeno un sensore guasto, qual è la probabilità che tutti i sensori tornino operativi (OK) entro 20 step?"

Risultato PRISM

Risultato: $\approx 97\%$ (0.97)

Analisi del Risultato

Il risultato dimostra l'alta efficacia dei meccanismi di Sensor Redundancy e Auto-Failover implementati. Con una probabilità del 97% di recovery completo entro 20 step, il sistema protetto offre garanzie significativamente superiori rispetto al 43.5% del sistema vulnerabile, un miglioramento di 53.5 punti percentuali.

Ogni sensore guasto ha una probabilità del 95% di recovery al passo successivo grazie all'Auto-Failover, garantendo che il sistema torni quasi sempre allo stato OPERATIONAL in tempi brevi. La mancata garanzia al 100% è dovuta alla probabilità residua del 5% che il meccanismo di failover non riesca, riflettendo scenari realistici in cui la ridondanza hardware può occasionalmente fallire. Il modello parte con il sensore E1 in stato FAILED (*init 1*) specificamente per testare questa proprietà, verificando empiricamente la capacità di recovery del sistema da condizioni degradate.

5.5.3 Proprietà di Active Defense Verification

Codice PCTL

```
1 P=? [ F el_locked ]
```

Spiegazione della Formula

Questa proprietà utilizza l'operatore **F** (Finally, senza limite temporale) per calcolare la probabilità che il sistema attivi eventualmente il blocco di sicurezza, verificando il funzionamento del meccanismo di Active Defense.

Interpretazione

La proprietà risponde alla domanda: "Qual è la probabilità che il sistema attivi il blocco di sicurezza (Lock) in risposta a tentativi di attacco ripetuti?"

Analisi

La verifica di questa proprietà conferma che l'IDS e il Rate Limiting funzionano correttamente come progettato. Dopo tre tentativi di attacco rilevati e bloccati (ognuno con probabilità 5%), il sistema attiva automaticamente la difesa attiva con probabilità unitaria, portando il sensore in uno stato di sicurezza definitiva (LOCKED) che garantisce protezione massima contro ulteriori attacchi. Questo meccanismo implementa una strategia di difesa adattiva che risponde proporzionalmente alla minaccia osservata, escalando automaticamente le misure di protezione quando rileva pattern di attacco persistente.

5.6 Confronto Quantitativo: Con vs Senza Contromisure

5.6.1 Confronto delle Matrici di Transizione

Transizione	CON Contromisure	SENZA Contromisure	Differenza
OK → OK	90%	80%	+10%
OK → FAILED	5%	5%	0% (guasto naturale)
OK → COMPROMISED	0%	15%	-15% (attacchi bloccati)
FAILED → OK	95%	60%	+35% (Auto-Failover)
FAILED → FAILED	5%	30%	-25%
FAILED → COMPROMISED	0%	10%	-10% (protezione anche in guasto)

Tabella 5.3: Confronto Matrici di Transizione

L'analisi comparativa evidenzia tre risultati fondamentali che quantificano l'impatto delle contromisure. La vulnerabilità è stata ridotta a zero: le transizioni verso lo stato COMPROMISED passano dal 15-10% allo 0%, eliminando completamente il rischio di compromissione in qualsiasi condizione operativa. Il recovery è significativamente migliorato: la transizione da FAILED a OK passa dal 60% al 95%, un incremento di 35 punti percentuali che riflette l'efficacia dell'Auto-Failover nel minimizzare i tempi di indisponibilità. La stabilità del sistema

è aumentata: la probabilità di rimanere nello stato OK passa dall'80% al 90%, riducendo la vulnerabilità agli eventi avversi e migliorando l'affidabilità complessiva del sistema.

5.6.2 Tabella Comparativa dei Risultati PRISM

Proprietà	CON C.	SENZA C.	Miglioramento
Safety (S1): Probabilità di NON compromissione in 100 step	100% (1.0)	0.0000149% (1.49E-7)	+99.9999851%
Guarantee/Response (G1): Probabilità di recovery completo in 20 step	97% (0.97)	43.5% (0.435)	+53.5%

Tabella 5.4: Confronto Risultati PRISM

Il confronto quantitativo dimostra inequivocabilmente l'efficacia delle contromisure implementate. Per la proprietà di Safety, il miglioramento è pressoché totale: la probabilità di non-compromissione passa da uno valore praticamente nullo a una garanzia del 100%, rappresentando un incremento di 99.9999851 punti percentuali che trasforma un sistema virtualmente indifendibile in uno matematicamente sicuro. Per la proprietà di Guarantee/-Response, il miglioramento è di 53.5 punti percentuali, passando dal 43.5% al 97%, un incremento che garantisce alta disponibilità anche in presenza di guasti hardware multipli.

5.6.3 Analisi delle Differenze

Safety: Impatto delle Contromisure Anti-Attacco

L'impatto delle contromisure sulla proprietà di Safety può essere attribuito a tre componenti tecnologiche chiave. Device Attestation con TPM e Mutual TLS bloccano gli attacchi di Spoofing riducendo la probabilità dal 5% allo 0%, garantendo che solo dispositivi autenticati possano comunicare con il sistema. Sensor Redundancy mitiga il Tampering riducendo la probabilità dal 10% allo 0%, implementando meccanismi di verifica dell'integrità fisica che rendono inefficaci le manomissioni. Active Defense composto da IDS, Rate Limiting e System Lock rileva e blocca attacchi persistenti, attivando protezioni graduate proporzionali alla minaccia osservata.

Il risultato aggregato è la riduzione della vulnerabilità da circa il 100% (probabilità di compromissione quasi certa in 100 step senza protezione) allo 0% (compromissione matematicamente impossibile con protezione). La dimostrazione matematica conferma questo risultato: senza contromisure, la probabilità di compromissione in 100 step è approssimativamente 99.9999851%; con contromisure, tale probabilità è esattamente 0%. L'efficacia delle contromisure è quindi la totale eliminazione del rischio di compromissione, trasformando un sistema vulnerabile in uno formalmente sicuro.

Guarantee/Response: Impatto dell'Auto-Failover

L'impatto sulla proprietà di Guarantee/Response è principalmente attribuibile a Sensor Redundancy combinata con Auto-Failover, che incrementa il tasso di recovery per step dal 60% al 95%. Questo miglioramento di 35 punti percentuali nella probabilità di recovery per singolo step si amplifica quando considerato su una finestra temporale di 20 step, producendo

un aumento della probabilità di recovery completo dal 43.5% al 97%, un miglioramento di 53.5 punti percentuali.

L'analisi matematica mostra che senza contromisure il recovery lento (60% per step) combinato con il rischio di compromissione (stato assorbente) produce una probabilità di recovery del 43.5% in 20 step. Con contromisure, il recovery rapido (95% per step) e l'eliminazione del rischio di compromissione producono una probabilità di recovery del 97% in 20 step, garantendo alta disponibilità del sistema anche in scenari di guasti multipli.

5.6.4 Spazio degli Stati

Entrambi i modelli condividono la stessa struttura base: cinque sensori con tre stati ciascuno (OK, FAILED, COMPROMISED), determinando uno spazio degli stati teorico di $3^5 = 243$ stati possibili. Tuttavia, nel modello con contromisure, lo stato COMPROMISED è formalmente irraggiungibile per tutti i sensori, riducendo significativamente lo spazio degli stati effettivo accessibile durante l'esecuzione del sistema.

Questa riduzione ha implicazioni positive per la complessità computazionale della verifica formale e dimostra matematicamente che le contromisure eliminano intere regioni dello spazio degli stati corrispondenti a configurazioni insicure. Dal punto di vista teorico, questo rappresenta una trasformazione del sistema da uno con 243 stati possibili a uno con uno spazio degli stati effettivo significativamente ridotto, dove tutte le configurazioni pericolose sono formalmente escluse dall'insieme degli stati raggiungibili.

5.7 Conclusioni Analisi Formale

5.7.1 Efficacia delle Contromisure

L'analisi di Markov Chain condotta mediante il model checker PRISM ha fornito una dimostrazione formale dell'efficacia delle contromisure di sicurezza implementate nel sistema di monitoraggio IoT. Per la proprietà di Safety, le contromisure riducono la vulnerabilità da approssimativamente il 100% (quasi certezza di compromissione in 100 step senza protezione) allo 0% (impossibilità matematica di compromissione con protezione), rappresentando un miglioramento pressoché totale che trasforma un sistema virtualmente indifendibile in uno formalmente sicuro.

Per la proprietà di Guarantee/Response, le contromisure migliorano la probabilità di recovery dal 43.5% al 97%, un incremento di 53.5 punti percentuali che garantisce alta disponibilità del sistema anche in presenza di guasti hardware multipli. Il meccanismo di Active Defense si è dimostrato efficace nel rilevare e bloccare attacchi persistenti, attivando protezioni adattive proporzionali alla minaccia osservata e garantendo protezione massima dopo ripetuti tentativi di compromissione.

5.7.2 Validità del Modello

Il modello PRISM sviluppato presenta diverse caratteristiche che ne garantiscono la validità scientifica e l'applicabilità ai sistemi reali. Il modello rappresenta fedelmente le minacce STRIDE identificate nell'analisi di sicurezza, in particolare Spoofing e Tampering, con probabilità di attacco calibrate realisticamente sul 15% totale (5% Spoofing + 10% Tampering).

Il modello codifica esplicitamente tutte le contromisure implementate, includendo TPM, Mutual TLS, Sensor Redundancy e Active Defense, permettendo di valutare separatamente il contributo di ciascuna componente alla sicurezza complessiva del sistema. L'utilizzo di logica temporale PCTL consente la verifica formale di proprietà di Safety e Guarantee/Response,

fornendo garanzie matematiche sul comportamento del sistema piuttosto che valutazioni empiriche soggette a incompletezza.

Il confronto quantitativo rigoroso tra sistema con e senza contromisure si basa su prove formali verificate automaticamente dal model checker, eliminando l'ambiguità delle valutazioni qualitative e fornendo metriche quantitative precise sull'efficacia delle misure di sicurezza implementate.

5.7.3 Limitazioni e Assunzioni

Il modello si basa su diverse assunzioni che rappresentano potenziali aree di miglioramento e estensione. Le probabilità di attacco (15% totale, suddiviso in 5% Spoofing e 10% Tampering) sono valori stimati che potrebbero variare in scenari operativi reali, richiedendo calibrazione empirica basata su dati di deployment effettivi e analisi delle minacce specifiche del contesto applicativo.

Il tasso di recovery del 95% assunto per l'Auto-Failover dipende dall'implementazione concreta della Sensor Redundancy e potrebbe essere influenzato da fattori hardware e software non modellati, quali latenze di rete, disponibilità di sensori ridondanti, e complessità delle procedure di failover. Il modello è semplificato: i sensori E2-E5 non includono esplicitamente le variabili di Active Defense per ridurre la complessità computazionale, assumendo che il comportamento dettagliato di E1 sia rappresentativo del meccanismo di protezione applicabile a tutti i componenti.

L'utilizzo di DTMC implica che il tempo sia modellato in step discreti piuttosto che in modo continuo, un'approssimazione ragionevole per sistemi con campionamento periodico ma che potrebbe non catturare dinamiche temporali continue o eventi asincroni che si verificano tra i campionamenti. Estensioni future potrebbero adottare Continuous-Time Markov Chains (CTMC) per modellare più fedelmente sistemi con eventi temporali continui.

5.8 Testing su Blockchain Privata (Besu)

Tutti i componenti sono stati integrati e testati in un ambiente reale basato su Hyperledger Besu.

5.8.1 Ambienti di Test

- **Unit Testing:** Suite completa di test JavaScript (Framework Truffle/Mocha) eseguita su Ganache per test rapidi della logica. - **Integration Testing:** Deployment su rete privata Besu a 4 nodi (consenso IBFT 2.0). Sono stati verificati simulando scenari di latenza di rete e spegnimento di un nodo validatore. - **Privacy Compliance:** Eseguiti test specifici (`test-offuscamento.js`) per validare che le tabelle CPT siano accessibili solo dall'Admin e che i dettagli sensibili siano verificabili solo tramite hash, impedendo letture non autorizzate.

5.8.2 Simulazione con Oracolo Scriptato

Utilizzando lo script `simula_oracolo.js`, è stato possibile testare il comportamento del sistema su un campione di N=1000 iterazioni simulate.

- **Scenario 1 (Condizioni Normali):** Con sensori che riportano valori nominali (90% dei casi), la Rete Bayesiana On-Chain ha correttamente valutato la probabilità di conformità > 95% nel 100% dei casi.

- **Scenario 2 (Manomissione):** Forzando il sensore "Sigillo" a `False`, la probabilità calcolata dal contratto `BNCore` è scesa immediatamente sotto la soglia di sicurezza, attivando lo stato di allarme.

5.8.3 Risultati

I test hanno dimostrato che il sistema mantiene la consistenza dei dati anche con un nodo offline. Le transazioni vengono confermate e finalizzate correttamente grazie al consenso IBFT. I monitor di runtime hanno intercettato correttamente il 100% delle transazioni anomale simulate (es. tentativi di registrare temperature fuori range senza triggerare allarmi).

Analisi della Qualità del Codice (Solhint)

In questo capitolo vengono presentati i risultati dell'analisi statica e dell'audit del codice Solidity. Viene descritta la metodologia adottata, il processo di ottimizzazione incrementale e la configurazione finale del linter Solhint per garantire la conformità agli standard di sicurezza e qualità.

6.1 Introduzione

L'analisi della qualità del codice rappresenta un aspetto fondamentale nello sviluppo di smart contract su blockchain Ethereum. Data la natura immutabile di tali applicazioni, dove errori possono portare a perdite economiche significative, l'adozione di strumenti di analisi statica è necessaria. Nel presente progetto si è utilizzato **Solhint**, uno dei principali linter per smart contract Ethereum, per garantire conformità alle best practices e ridurre il debito tecnico.

6.2 Metodologia

6.2.1 Solhint: Caratteristiche

Solhint è un linter open-source per Solidity che esegue analisi statica del codice, configurabile tramite file `.solhint.json`. Le categorie principali di regole includono: **Best Practices**, **Gas Optimization**, **Security**, e **Style Guide**.

6.2.2 Installazione ed Esecuzione

Per replicare l'analisi, sono stati utilizzati i seguenti comandi e configurazioni npm:

```
1 # Installazione
2 npm install --save-dev solhint
3 npx solhint --init
4
5 # Esecuzione analisi
6 npx solhint 'contracts/**/*.sol'
7 npx solhint contracts/BNCore.sol
8
9 # Output e utility
10 npx solhint 'contracts/**/*.sol' > report.txt
11 npx solhint 'contracts/**/*.sol' 2>&1 | grep -c "warning"
12
```

```

13 # Script npm (in package.json)
14 {
15   "scripts": {
16     "lint": "solhint 'contracts/**/*.sol'"
17   }
18 }
19 npm run lint

```

Listing 6.1: Comandi principali Solhint

6.3 Risultati Iniziali

L'esecuzione iniziale ha evidenziato **137 warning** (0 errori), confermando la correttezza sintattica del codice.

Tabella 6.1: Categorizzazione warning iniziali

Categoria	Count	%
NatSpec Documentation	57	42%
Naming Conventions	48	35%
Gas Optimizations	25	18%
Function Complexity	3	2%
Import Style	3	2%
Totale	137	100%

6.4 Processo di Ottimizzazione

Il processo è stato condotto in tre fasi successive.

6.4.1 Fase 1: Miglioramenti al Codice (-56 warning)

Documentazione NatSpec (31 warning)

Sono stati documentati 17 eventi con commenti NatSpec completi (@notice, @param):

```

1 /// @notice Emesso quando le probabilita' vengono impostate
2 /// @param p_F1_T Probabilita' F1 (0-100)
3 /// @param p_F2_T Probabilita' F2 (0-100)
4 /// @param admin Indirizzo amministratore
5 event ProbabilitaAPrioriImpostate(
6     uint256 indexed p_F1_T,
7     uint256 indexed p_F2_T,
8     address indexed admin
9 );

```

Listing 6.2: Esempio NatSpec

Ottimizzazioni Gas (3 warning)

Pre-increment (risparmio ~5 gas):

```

1 // Prima: _contatoreIdSpedizione++;
2 // Dopo: ++_contatoreIdSpedizione;

```

Custom errors (risparmio ~1000 gas on revert, ~200 bytes bytecode):

```

1 // Prima
2 require(_hashedDetails != bytes32(0), "Hash non valido");
3
4 // Dopo
5 error HashDettagliNonValido();
6 if (_hashedDetails == bytes32(0))
7     revert HashDettagliNonValido();

```

Refactoring Funzioni (2 warning)

La funzione `_calcolaProbabilitaCombinata` è stata ridotta da 66 a 13 linee estraendo l'helper `_applicaCPT`, migliorando modularità e testabilità.

```

1 function _applicaCPT(
2     bool _ricevuta, bool _valore,
3     bool _f1, bool _f2, CPT memory _cpt
4 ) internal pure returns (uint256) {
5     if (!_ricevuta) return PRECISIONE;
6     uint256 p_T;
7     if (_f1 == false && _f2 == false) p_T = _cpt.p_FF;
8     else if (_f1 == false && _f2 == true) p_T = _cpt.p_FT;
9     else if (_f1 == true && _f2 == false) p_T = _cpt.p_TF;
10    else p_T = _cpt.p_TT;
11    return _leggiValoreCPT(_valore, p_T);
12 }

```

Listing 6.3: Helper function

6.4.2 Fase 2: Configurazione Naming (-42 warning)

Disabilitate regole naming per compatibilità con convenzioni domain-specific:

```

1 {
2     "var-name-mixedcase": "off",
3     "func-name-mixedcase": "off",
4     "const-name-snakecase": "off"
5 }

```

6.4.3 Fase 3: Configurazione Gas (-18 warning)

Analisi costi-benefici ha evidenziato risparmio totale < 100 gas/tx ($\sim \$0.0001$), non proporzionale alla riduzione di leggibilità. Regole disabilitate:

```

1 {
2     "gas-strict-inequalities": "off",
3     "gas-indexed-events": "off",
4     "gas-callldata-parameters": "off",
5     "gas-small-strings": "off"
6 }

```

Esempio strict inequalities:

```

1 // Mantenuto (chiaro)
2 if (probF1 >= SOGLIA_PROBABILITA)
3 // Non implementato ( $\sim \$3$  gas, meno chiaro)
4 if (probF1 > SOGLIA_PROBABILITA - 1)

```

6.5 Configurazione Finale

```

1 {
2   "extends": "solhint:recommended",
3   "rules": {
4     "compiler-version": ["error", "^0.8.0"],
5     "func-visibility": ["warn",
6       {"ignoreConstructors": true}],
7     "no-unused-vars": "warn",
8
9     // Naming - OFF
10    "const-name-snakecase": "off",
11    "func-name-mixedcase": "off",
12    "var-name-mixedcase": "off",
13
14    // Gas - OFF per leggibilità
15    "gas-strict-inequalities": "off",
16    "gas-indexed-events": "off",
17    "gas-calldata-parameters": "off",
18
19    // Style - ON
20    "contract-name-mixedcase": "warn",
21    "event-name-mixedcase": "warn"
22  }
23 }

```

Listing 6.4: .solhint.json completo

6.6 Risultati Finali

6.6.1 Metriche Quantitative

Tabella 6.2: Evoluzione warning

Fase	Warning	Δ	%
Baseline	137	-	-
Fase 1 (Code)	81	-56	-41%
Fase 2 (Naming)	39	-42	-72%
Fase 3 (Gas)	21	-18	-85%

Risultato: 21 warning finali rappresentano una riduzione dell'85%.

6.6.2 Warning Rimanenti

Tabella 6.3: Breakdown warning finali

Categoria	N.	Motivazione
Import globali	3	Necessari per custom errors
Function complexity	1	Algoritmo critico (validaEPaga, 53/50 linee)
Code complexity	5	Business logic necessaria
Naming/style	12	Convenzioni progettuali
Totale	21	

Tutti i warning residui sono giustificati da scelte architetturali deliberate.

6.7 Considerazioni Critiche

Limiti analisi statica

- Non identifica vulnerabilità logiche (richiede testing/audit)
- Possibili false positivi su pattern legittimi
- Necessità configurazione domain-specific

Complementarietà con altri tool Solhint dovrebbe essere integrato con Slither (vulnerabilità), Mythril (analisi simbolica), Echidna (fuzzing), Hardhat (testing).

6.8 Conclusioni

L'analisi Solhint ha ridotto i warning dell'85% ($137 \rightarrow 21$) attraverso:

1. **Miglioramenti codice:** NatSpec, gas optimization, refactoring
2. **Configurazione consapevole:** Disabilitazione regole incompatibili
3. **Trade-off analizzati:** Leggibilità prioritizzata su micro-ottimizzazioni

I 21 warning residui sono giustificati. Il progetto raggiunge metriche eccezionali (~ 6 warning/KLOC, 95% documentation) posizionandosi significativamente sopra gli standard industriali.

6.8.1 Raccomandazioni

- **CI/CD:** Integrare Solhint nel pipeline
- **Pre-commit hooks:** Analisi automatiche prima di ogni commit
- **Revisione periodica:** Aggiornare configurazione con nuove versioni tool

Solhint si conferma strumento essenziale per progetti blockchain professionali, quando utilizzato con consapevolezza critica.

Conclusioni e Sviluppi Futuri

Questo capitolo conclude il lavoro sintetizzando i risultati ottenuti rispetto agli obiettivi di sicurezza e integrità del dato. Vengono inoltre analizzate criticamente le limitazioni dell'attuale implementazione e proposti scenari di evoluzione futura.

7.1 Sintesi dei Risultati

Il progetto ha dimostrato la fattibilità tecnica di un sistema di tracciabilità farmaceutica che non si limita alla semplice registrazione passiva dei dati, ma implementa una logica decisionale attiva e decentralizzata.

I principali traguardi raggiunti includono:

1. **Integrità Bayesiana:** L'implementazione on-chain della Rete Bayesiana (BNCore) ha permesso di validare la coerenza delle letture multisensoriali, riducendo drasticamente il rischio di accettare lotti compromessi a causa di falsi negativi dei singoli sensori.
2. **Resilienza Architetturale:** L'adozione di Hyperledger Besu con consenso IBFT 2.0 ha garantito la continuità del servizio e l'immutabilità dei dati anche in presenza di guasti o attacchi a un nodo validatore (fino a $f = 1$ su $N = 4$).
3. **Sicurezza Difensiva:** L'applicazione rigorosa dei principi di Secure Programming (Monitor Runtime, Checks-Effects-Interactions) ha prevenuto vulnerabilità comuni come la Reentrancy e l'accesso non autorizzato ai fondi in escrow.
4. **Verifica Formale:** L'utilizzo di PRISM ha fornito una garanzia matematica sul rispetto delle proprietà di Safety (probabilità di errore $< 0.1\%$) e Guarantee.

7.2 Limitazioni Attuali

Nonostante il successo del prototipo, esistono limitazioni che devono essere considerate per un deployment in produzione:

- **Scalabilità On-Chain:** Il calcolo bayesiano in Solidity, sebbene ottimizzato, consuma una quantità di Gas non trascurabile. Su una mainnet pubblica (es. Ethereum) i costi operativi potrebbero essere proibitivi; su una rete privata Besu (dove il Gas è gratuito o calmierato) il problema è ridotto al tempo di esecuzione.

- **Privacy dei Dati:** Sebbene sia stato implementato un meccanismo di hashing per offuscare i dettagli del carico (es. nome farmaco), i metadati delle transazioni e i valori grezzi dei sensori rimangono visibili ai nodi validatori. La privacy ottenuta è parziale (pseudonimato); una riservatezza totale richiederebbe tecnologie Zero-Knowledge (es. zk-SNARKs).
- **Simulazione IoT:** L'hardware IoT è attualmente simulato. La sicurezza fisica del sensore ("Hardware Root of Trust") esula dallo scopo di questo progetto software, ma rappresenta un vettore di attacco critico nel mondo reale.

7.3 Sviluppi Futuri

Per superare le limitazioni identificate e aumentare il livello di maturità del sistema (TRL), si propongono le seguenti evoluzioni:

7.3.1 Integrazione zk-SNARKs (Privacy)

L'adozione di protocolli a conoscenza zero (Zero-Knowledge Proofs) permetterebbe al corriere di dimostrare la conformità della spedizione ("La temperatura è rimasta nel range") senza rivelare i valori esatti o i dettagli del tragitto, garantendo privacy commerciale e conformità GDPR.

7.3.2 Oracle Feed decentralizzati (Chainlink)

Sostituire lo script di simulazione centralizzato con una rete di oracoli decentralizzati (es. Chainlink) per leggere i dati dai dispositivi IoT. Questo eliminerebbe il singolo punto di fallimento rappresentato dallo script Node.js.

7.3.3 Hardware Security Module (HSM)

Integrazione con sensori dotati di Secure Element per la firma delle transazioni direttamente "at the edge". Questo garantirebbe che il dato firmato provenga fisicamente dal dispositivo e non sia stato iniettato via software.

In conclusione, il lavoro svolto pone basi solide per una logistica 4.0 più sicura, dimostrando come l'intersezione tra Blockchain, Metodi Formali e IoT possa generare valore reale in contesti critici per la salute pubblica.

A.1 Requisiti di Sistema (Prerequisiti)

Per eseguire l'intero stack del progetto sono necessari i seguenti strumenti:

- **Node.js** (versione $\geq 16.0.0$) e **NPM**
- **Docker** e **Docker Compose** (per il nodo Besu)
- **Truffle Suite** (per compilazione e deploy Smart Contracts)
- **Ganache** (opzionale, per test rapidi in locale)
- **Git**
- **Java JDK 11+** (se si esegue Besu nativamente senza Docker)

A.2 Installazione e Setup

A.2.1 Clonazione del Repository

Il codice sorgente è ospitato su GitHub. Eseguire il clone:

```
1 git clone https://github.com/lucabelard/ProgettoSoftwareSecurity.git
2 cd ProgettoSoftwareSecurity
```

A.2.2 Installazione Dipendenze

Installare le dipendenze per l'interfaccia web e gli script di test:

```
1 npm install
2 cd web-interface
3 npm install
```

A.3 Avvio della Rete Blockchain

A.3.1 Modalità Sviluppo (Ganache)

1. Avviare Ganache (GUI o CLI) sulla porta 7545. 2. Configurare `truffle-config.js` per puntare a `127.0.0.1:7545`. 3. Eseguire il deploy:

```
1 truffle migrate --reset --network development
```

A.3.2 Modalità Produzione (Hyperledger Besu)

1. Navigare nella cartella `besu-network`. 2. Avviare i nodi validatori:

```
1 ./start_nodes.sh
```

3. Attendere che i nodi siano sincronizzati (consenso IBFT 2.0). 4. Eseguire il deploy sulla rete Besu:

```
1 truffle migrate --reset --network besu
```

A.4 Esecuzione degli Script di Simulazione

Per testare il sistema end-to-end con dati simulati:

```
1 node simula_oracolo.js
```

Questo script simulerà l'invio di dati dai sensori e l'interazione con l'Oracolo on-chain.

A.5 Interfaccia Web

Per avviare la dashboard utente (necessita di Node.js installato):

```
1 cd web-interface
2 npx http-server .
```

L'applicazione sarà accessibile di default a `http://localhost:8080`. Assicurarsi di avere MetaMask configurato sulla rete locale (Chain ID 1337 o 2024 a seconda della configurazione Ganache/Besu).