



Corso di Laurea in Informatica

TESI DI LAUREA

Studio della gestione degli intenti nel controller SDN  
Teraflow

**Relatore:**

**Federica Paganelli**

**Candidato:**

**Carolina Ferrari**

**Correlatore:**

**Stefano Forti**

**ANNO ACCADEMICO 2023/2024**

# Indice

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introduzione</b>  | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Background</b>  | <b>5</b>  |
| 2.1      | Software Defined Networking . . . . .                                | 5         |
| 2.2      | Intent-based Networking . . . . .                                    | 9         |
| 2.3      | Controller allo stato dell'arte . . . . .                            | 11        |
| 2.3.1    | ONOS . . . . .   | 11        |
| 2.3.2    | ODL . . . . .  | 14        |
| 2.4      | Kubernetes . . . . .   | 17        |
| 2.5      | Miscroservizi . . . . .  | 19        |
| <b>3</b> | <b>TeraFlow: architettura e gestione degli intenti</b>               | <b>22</b> |
| 3.1      | Componenti architetturali . . . . .                                  | 23        |
| 3.1.1    | Device Level Abstraction . . . . .                                   | 25        |
| 3.1.2    | Service Level Abstraction . . . . .                                  | 27        |
| 3.1.3    | Management Level Abstraction . . . . .                               | 28        |
| 3.2      | gRPC . . . . .   | 30        |
| <b>4</b> | <b>Studio e sperimentazione della gestione di policy in Teraflow</b> | <b>34</b> |
| 4.1      | Strumenti per la sperimentazione . . . . .                           | 35        |
| 4.1.1    | Mininet . . . . .  | 35        |
| 4.1.2    | P4 . . . . .   | 39        |
| 4.2      | Descrizione Workflow . . . . .                                       | 42        |
| 4.3      | Sperimentazione . . . . .  | 45        |
| 4.3.1    | Demo . . . . .   | 46        |
| 4.3.2    | Esperimento 2 . . . . .  | 49        |
| 4.3.3    | Esperimento 3 . . . . .  | 51        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>5</b> | <b>Conclusioni</b>                               | <b>55</b> |
| <b>6</b> | <b>Appendice</b>                                 | <b>56</b> |
| 6.1      | Installazione ODL . . . . .                      | 56        |
| 6.2      | Script Agent per latenza e packet loss . . . . . | 57        |
| 6.3      | Script policyAddService . . . . .                | 57        |
| 6.4      | script ping2 latenza e packet loss . . . . .     | 57        |

## Elenco delle figure

|      |  |    |
|------|--|----|
| 2.1  | Struttura di una rete SDN [1] . . . . .                          | 7  |
| 2.2  | Architettura di ONOS [2] . . . . .                               | 12 |
| 2.3  | Architettura del controller OpenDayLight [3] . . . . .           | 14 |
| 2.4  | Architettura di Kubernetes [4] . . . . .                         | 17 |
| 3.1  | Architettura di TeraFlow [5] . . . . .                           | 24 |
| 3.2  | Macchina a stati interna alla componente di policy [6] . . . . . | 30 |
| 3.3  | Funzionamento del protocollo gRPC [7] . . . . .                  | 31 |
| 3.4  | Esempio di Protocol Buffer file in TeraFlow [8] . . . . .        | 32 |
| 4.1  | Rete mininet . . . . .   | 36 |
| 4.2  | Workflow di P4 sul piano dati [9] . . . . .                      | 41 |
| 4.3  | Interazione tra alcune componenti in TeraFlow . . . . .          | 43 |
| 4.4  | Servizio . . . . .   | 47 |
| 4.5  | Servizio 4 sw iniziale . . . . .                                 | 47 |
| 4.6  | File policyservice modificato . . . . .                          | 48 |
| 4.7  | Politica con regola di latenza . . . . .                         | 48 |
| 4.8  | Servizio 4 sw cambio percorso . . . . .                          | 49 |
| 4.9  | Servizio 8 sw iniziale . . . . .                                 | 50 |
| 4.10 | Creazione kpi . . . . .  | 51 |
| 4.11 | Politica latenza e pkt loss . . . . .                            | 51 |
| 4.12 | Servizio 8 sw cambio percorso . . . . .                          | 52 |
| 4.13 | abilene iniziale . . . . .                                       | 53 |
| 4.14 | Servizio 8 sw cambio percorso . . . . .                          | 53 |
| 4.15 | Servizio 8 sw cambio percorso . . . . .                          | 54 |
| 4.16 | abilene cambio . . . . .   | 54 |
| 6.1  | Installazione ODL . . . . .                                      | 56 |

6.2 Alcune features disponibili . . . . . 57

# 1. Introduzione

L'evoluzione delle reti moderne, accompagnata dall'incremento delle esigenze di prestazioni, affidabilità e dall'aumento della quantità del traffico, ha portato alla necessità di sviluppare nuovi paradigmi di gestione e controllo delle reti.

In questo contesto, il Software Defined Networking (SDN) ha rivoluzionato la gestione delle reti attraverso un approccio logicamente centralizzato e programmabile separando il piano di controllo dal piano dati. Questa separazione permette agli amministratori di rete di semplificare configurazioni complesse e di introdurre politiche di rete dinamiche e affidabili. Inoltre, SDN fornisce il supporto per interfacce nordbound e southbound che facilitano rispettivamente l'integrazione con varie applicazioni di terze parti e con i dispositivi nella rete, contribuendo a un ecosistema più flessibile e reattivo [10].

L'SDN è oggi largamente impiegato in diversi contesti. Nei cloud data center, ad esempio, consente una gestione semplificata e ottimizzata dell'infrastruttura di rete, migliorando la distribuzione delle risorse e l'efficienza delle attività amministrative riducendo allo stesso tempo i costi [11]. Nelle reti di trasporto, SDN viene utilizzato per gestire il traffico in modo più dinamico e flessibile, permettendo un'ottimizzazione della larghezza di banda su lunghe distanze. Allo stesso modo, nelle reti mobili, SDN offre un controllo più efficiente dell'infrastruttura di comunicazione tra le applicazioni, i servizi in cloud e l'utente finale. In particolare, con l'avvento del 5G, l'SDN assume un ruolo fondamentale nel regolare dinamicamente la larghezza di banda per ciascun punto di accesso radio fornendo una gestione flessibile dei router e delle risorse di rete[12] [13].

Tuttavia, nonostante l'SDN astragga il controllo di gestione dai dispositivi, le sue funzioni rimangono principalmente focalizzate sulla configurazione dei singoli componenti della rete. Le attuali interfacce SDN, infatti, si concentrano sulla definizione dettagliata dei percorsi per la trasmissione dei dati piuttosto che su un modello più astratto che permetta agli amministratori di esprimere in modo semplice cosa desiderano ottenere dalla rete [10]. Questo approccio, benché efficace nella gestione delle risorse di rete, limita parzialmente la flessibilità e l'automazione in contesti fortemente dinamici, come quelli caratterizzati

da architetture di Edge Computing o reti altamente virtualizzate.

Per questo motivo viene introdotto l'Intent-Based Networking (IBN), o Networking basato su intenti, un paradigma che mira a separare ulteriormente la complessità di implementazione dal livello di gestione. IBN affronta le sfide emergenti fornendo un'astrazione di alto livello che consente di esprimere gli obiettivi di rete in modo chiaro e intuitivo. Ad esempio, un intento potrebbe essere: *"consentire alle applicazioni contabili di accedere al server XYZ, ma non consentire l'accesso alle applicazioni di produzione"* oppure *"mantenere sempre un'elevata qualità del servizio e un'elevata larghezza di banda per gli utenti di un certo livello"* [14].

Il framework IBN si occupa di tradurre gli intenti in configurazioni di rete specifiche adattando dinamicamente la rete per rispettarli. Grazie al paradigma SDN, IBN non richiede l'inserimento manuale dei comandi di policy: una volta ricevute le richieste di servizio, le converte in Key Performance Indicators (KPI), che rappresentano le metriche rilevanti da monitorare. Questo permette una verifica continua dello stato della rete, assicurandosi che soddisfi le richieste attraverso un monitoraggio in tempo reale delle KPI, garantendo così un'elevata qualità dell'esperienza (QoE) [15]. Questo approccio consente quindi alla rete di adattarsi dinamicamente ai cambiamenti, gestendo automaticamente le complessità sottostanti, migliorando l'efficienza e la reattività.

Alcuni controller SDN implementano già il concetto di Intent-Based Networking.

ONOS, ad esempio, integra un componente chiamato Intent Framework, che consente alle applicazioni di esprimere le loro esigenze tramite direttive basate su policy. In modo diverso, OpenDayLight ha sviluppato l'Intent Northbound Interface (NBI), un progetto attivo fino alla release "Oxygen" del 2018 ma successivamente abbandonato per favorire approcci più pratici e scalabili. Cisco, con il suo DNA Center, ha introdotto soluzioni IBN che automatizzano la configurazione e l'implementazione della rete grazie all'intelligenza artificiale e all'apprendimento automatico concentrandosi principalmente sulla sicurezza. Ad esempio, quando un nuovo dispositivo viene aggiunto all'infrastruttura, il sistema assegna automaticamente policy basate sulla sua identità, proponendosi di risolvere i problemi di funzionamento della rete [15].

Recentemente nell'ambito del progetto europeo TeraFlow H2020, è stato sviluppato in

controller SDN omonimo. L'obiettivo di questa tesi è lo studio del controller open source Teraflow, sviluppato da ETSI [16] a partire dal 2020. In particolare il lavoro si è concentrato su come in TeraFlow vengano modellati e gestiti gli "intenti" attraverso le componenti di policy e service. Nella prima fase, è stato necessario comprendere l'architettura del controller per capire come le diverse componenti interagiscano tra loro e come queste supportino la gestione dei servizi e delle politiche di rete. L'analisi teorica è stata accompagnata dallo studio del codice e da test basati su scenari forniti dagli sviluppatori del progetto. Questi test sono stati cruciali per comprendere il comportamento del sistema in condizioni applicative specifiche vista la scarsità della documentazione aggiornata. Successivamente, si è passati alla fase di sperimentazione.

Non avendo a disposizione una rete reale, è stato utilizzato l'emulatore di reti Mininet come ambiente di test.

Partendo da file preesistenti, sono stati configurati dei servizi tra due end-points utilizzando differenti topologie, permettendo la comunicazione tra di essi. Per garantire l'elevata qualità del servizio (QoS), sono state implementate delle politiche di gestione della rete, una per ogni servizio, basate su tre KPI principali: il rapporto di perdita dei pacchetti (loss ratio), la latenza e la capacità. Questi parametri dovevano rispettare soglie predefinite per assicurare prestazioni di alto livello. Un elemento chiave dell'esperimento è stato il meccanismo di reazione automatica implementato tramite il controller quando una delle metriche superava i limiti stabiliti. In questo esempio specifico, il sistema interveniva automaticamente attivando il ricalcolo del percorso del traffico tra gli end-points per ristabilire i livelli di performance richiesti.

Per garantire un monitoraggio continuo delle metriche, è stato implementato un probe, un programma di utilità che cattura informazioni e, in questo caso utilizzando protocolli come ping e iperf, misura costantemente le metriche critiche (latenza, perdita di pacchetti, capacità). Queste informazioni venivano inviate al controller che le utilizzava per prendere le decisioni in tempo reale riducendo al minimo l'impatto negativo sull'esperienza degli utenti.

Il resto del documento sarà organizzato come segue.

Nel Capitolo 2 verrà esposto il contesto. All'interno ci sarà un'analisi approfondita del



Software Defined Networking (SDN), dell'Intent-Based Networking (IBN) e verranno illustrati alcuni dei principali controller SDN presenti sul mercato che implementano soluzioni differenti per l'IBN. Alla fine del capitolo saranno introdotti Kubernetes e i micro-servizi che stanno alla base del design di TeraFlow.

Nel Capitolo 3 verrà descritto in modo approfondito il controller Teraflow su cui si incentra la tesi. Verrà delineata l'architettura e l'interazione necessaria tra le componenti con attenzione particolare alle componenti coinvolte nella gestione dei servizi e delle policy. Sarà inoltre introdotto gRPC, un framework grazie al quale le componenti comunicano tra di loro. Nel Capitolo 4 vengono presentati gli esperimenti svolti che costituiscono la parte pratica del lavoro. Dopo aver introdotto la teoria e gli strumenti necessari, viene definita la configurazione di un servizio di rete tra due end-point. Gli esperimenti includono la gestione automatica delle politiche di rete e il monitoraggio dei parametri con l'adozione di misure correttive nel caso essi non siano più rispettati. Infine, nell'ultimo Capitolo, saranno presentate le conclusioni.

## 2. Background

Nel seguente Capitolo verranno presentate le principali tecnologie alla base di questo lavoro, ovvero il Software Defined Networking (SDN) e l'Intent-Based Networking (IBN). Verranno descritti due dei controller SDN più rilevanti allo stato dell'arte, ONOS [17] e OpenDaylight (ODL) [18] e infine Kubernetes e i microservizi, tecniche alla base del controller TeraFlow.

Questa panoramica fornirà il contesto necessario per comprendere meglio i successivi sviluppi trattati nel documento.

### 2.1 Software Defined Networking

L'architettura tradizionale di rete si basa su dispositivi fisici di interconnessione che facilitano la comunicazione tra più host a livello locale e consentono lo scambio di informazioni. Nell'architettura tradizionale, con un controller decentralizzato, ciascun dispositivo integra al suo interno sia le funzioni del piano dati (data plane) che del piano di controllo (control plane).

Il piano dati è responsabile della ricezione, del processamento e dell'inoltro dei pacchetti in base alle tabelle di routing che associano un indirizzo a una data porta d'uscita [19]. Queste tabelle vengono gestite dal piano di controllo che calcola i percorsi per l'instradamento in base alla destinazione dei pacchetti e aggiorna le tabelle dei dispositivi. Nei protocolli di rete tradizionali, questi due piani operano separatamente all'interno dei dispositivi svolgendo i loro compiti in maniera indipendente.

Per determinare i percorsi di rete esistono diversi protocolli di routing che adottano un approccio decentralizzato.

RIP (Routing Information Protocol), ad esempio, utilizza un algoritmo di distance-vector in cui ogni nodo conosce solo le informazioni dai suoi vicini, quindi non la conformazione globale dell'infrastruttura, e aggiorna la propria tabella sulla base dei messaggi di routing scambiati [20]. Il protocollo OSPF (Open Shortest Path First) adotta invece un approccio

globale. In questo caso, ogni router all'interno dell'area conosce la topologia completa della rete e calcola i percorsi in modo indipendente utilizzando l'algoritmo di Dijkstra [21].

Questo approccio richiede in ogni caso l'esecuzione di un algoritmo di routing che, tramite un protocollo dedicato, scambia messaggi con altri dispositivi per prendere decisioni. Tuttavia, ciò introduce ritardi non necessari, rendendo così la rete meno adatta alle nuove esigenze delle applicazioni moderne che necessitano di un'elevata dinamicità.

La complessità e la staticità dell'architettura di rete tradizionale, progettata intorno a una serie di protocolli indipendenti, ciascuno focalizzato su una parte specifica delle esigenze di rete, aumentano le difficoltà nel rispondere alle nuove sfide poste da tecnologie emergenti come il cloud computing, i big data, lo streaming in tempo reale e l'Internet of Things (IoT).

Aggiungere o spostare dispositivi nella rete diventa particolarmente complicato: ogni volta che avviene una modifica, gli operatori devono aggiornare manualmente le configurazioni di numerosi dispositivi introducendo un significativo problema di scalabilità. Per far fronte a limitazioni di capacità e ai picchi di traffico imprevedibili, invece di aggiungere collegamenti, molte aziende sovradimensionano quelli già presenti nella rete in base alle previsioni di traffico che però risultano spesso inadeguate.

Un ulteriore ostacolo è rappresentato dalla mancanza di interfacce aperte e standardizzate per le funzioni di rete. Questa dipendenza dai fornitori di apparecchiature con protocolli proprietari riduce la flessibilità e rallenta l'introduzione di nuove funzionalità [22].

Le reti tradizionali, con il loro approccio distribuito e decentralizzato al controllo e all'instradamento, si sono dimostrate inefficaci nel rispondere rapidamente a cambiamenti dinamici.

Il Software Defined Networking (SDN) nasce per rimediare ai limiti delle attuali infrastrutture di rete [23]. Proposto negli ultimi anni dalla Open Networking Foundation (ONF) [24], SDN introduce un'architettura che separa il piano di controllo dal piano dati, rendendo quest'ultimo programmabile e semplificando la gestione della rete. A differenza delle reti tradizionali, dove il controllo è distribuito su ogni dispositivo, SDN centralizza il controllo logico tramite un controller che gestisce e coordina le politiche di rete, la confi-

gurazione e l'instradamento. Questa separazione permette ai dispositivi di rete di operare come semplici apparati di inoltro, mentre il controller centrale gestisce le decisioni più complesse.

Per poter funzionare, i dispositivi devono essere in grado di comunicare con il controller e riconoscere cambiamenti significativi degni di notifica per una gestione ottimizzata della rete. Questo è possibile tramite l'installazione al loro interno di componenti software con le caratteristiche necessarie detti agent [25].

La base di questo paradigma è un controller remoto che, interagendo con gli agent locali, riceve informazioni sui collegamenti e sul traffico in tempo reale ed è in grado di configurare autonomamente i dispositivi collegati sulla base degli eventi notificati o delle richieste da parte degli utenti. Lo scopo principale è quindi ridurre e semplificare il carico di amministrazione per i singoli dispositivi.

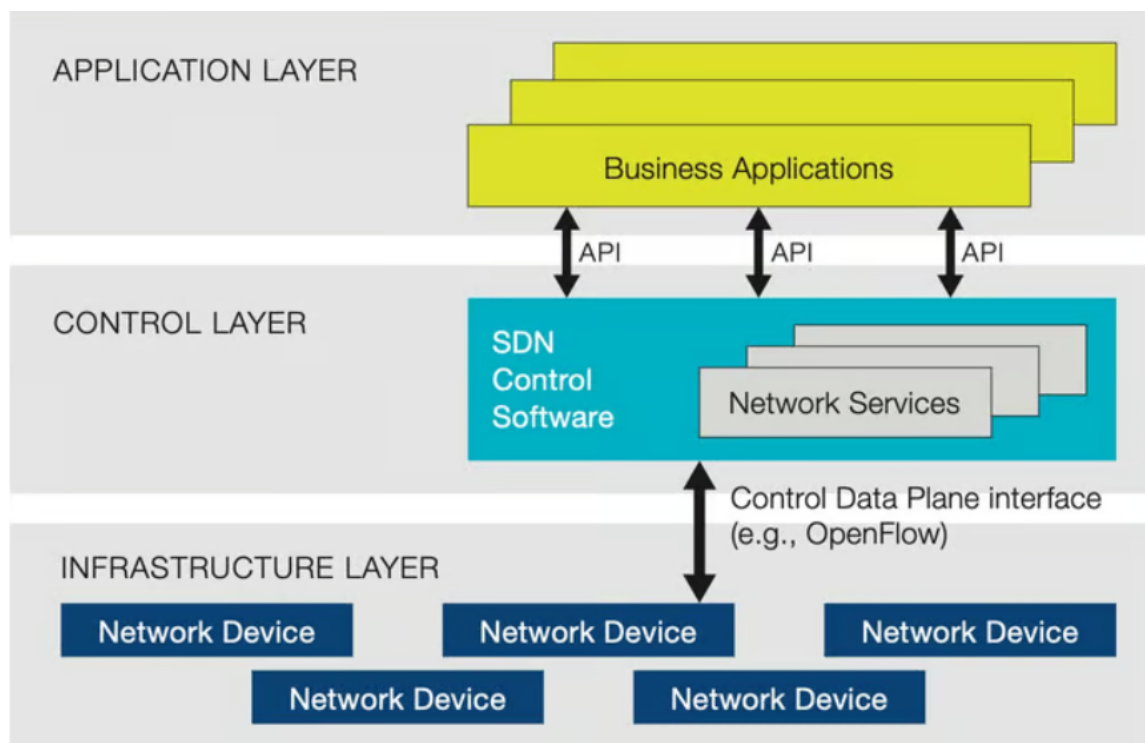


Figura 2.1: Struttura di una rete SDN [1]

Come si può notare dalla Figura 2.1 la rete viene suddivisa in tre livelli: Infrastructure layer, Control layer e Application layer [26].

Partendo dal livello più basso troviamo l'infrastruttura di rete il cui unico compito è implementare il piano dati, ossia la parte che supporta un protocollo condiviso per comunicare con il controller e installare le regole di inoltro per i pacchetti sulla base delle configurazioni imposte da quest'ultimo. Questa divisione consente di evitare algoritmi di routing all'interno dei dispositivi di rete visto che l'inoltro sarà gestito direttamente dai livelli sovrastanti [25].

Nel control layer si trova il controller SDN che, tramite API northbound (NBI) e southbound (SBI), permette di comunicare con gli altri due livelli. Le API NBI consentono al controller di interfacciarsi con le applicazioni e i servizi situati nel livello superiore, mentre le API SBI, tipicamente implementate tramite OpenFlow, permettono al controller di comunicare con i dispositivi di rete nel livello inferiore.

Il control layer consente l'implementazione del piano di controllo, che gestisce la configurazione e l'ottimizzazione delle risorse. Attraverso programmi dinamici e automatizzati, il controller calcola i percorsi ottimali per il traffico di rete non più sulla base della destinazione ma in modo generalizzato sui vari header del pacchetto e, tramite le API SBI, impone regole di inoltro ai dispositivi sottostanti. Questo processo include la manipolazione delle tabelle di routing e l'aggiornamento delle stesse in risposta a eventi in tempo reale.

Il controller è logicamente centralizzato, in questo modo il piano di gestione (management plane) situato sopra di esso interagisce con un unico punto di accesso [19]. Fisicamente può anche essere distribuito, soprattutto nei processi di produzione, per garantire scalabilità e affidabilità [26].

L'application layer comprende le applicazioni e i servizi che sfruttano le capacità della rete SDN per la realizzazione del piano di gestione. Grazie a questo livello si possono definire politiche o intenti da implementare all'interno della rete tramite interfacce grafiche e strumenti dedicati all'utente finale. Queste regole, tramite le API NBI, sono poi comunicate al controller che si occuperà di farle rispettare mediante il costante monitoraggio delle risorse del piano dati. Per esempio, nel contesto dell'application layer, le applicazioni possono includere strumenti tradizionali come firewall, che definiscono politiche di sicurezza per bloccare il traffico da indirizzi IP sospetti [27] o bilanciatori di carico, che distribuiscono

il traffico tra diversi server per evitare sovraccarichi e ottimizzare l'uso delle risorse per migliorare le prestazioni.

Il disaccoppiamento dei vari livelli consente alla rete di diventare direttamente programmabile da un'unica unità centralizzata riuscendo a mantenere una visione globale e permettendo l'astrazione dell'infrastruttura sottostante per affrontare le sfide di gestione incontrate nelle reti moderne.

## **2.2 Intent-based Networking**

L'Intent-Based Networking (IBN) è un paradigma innovativo per la gestione delle reti che permette di separare la complessità di implementazione dal livello di gestione. Esso è nato per rispondere alla crescente ampiezza e dinamicità delle reti moderne, dove la gestione tradizionale basata su comandi manuali e configurazioni dettagliate non è più sostenibile. Negli ultimi anni, grazie a nuove tecnologie come il 5G o l'Internet of Things (IoT), applicazioni innovative stanno emergendo in differenti campi industriali.

In questo contesto, le implementazioni cloud si sono estese ed è diventato essenziale aumentare le capacità di elaborazione, eseguire servizi distribuiti e garantire il comportamento interattivo che queste nuove applicazioni richiedono.

Sono state concepite diverse tecnologie emergenti, tra cui l'IBN, per far fronte a queste necessità. Ognuna ha differenti obiettivi e spesso si integrano tra loro [28].

Il Multi-Access Edge Computing[29] (MEC) fornisce funzionalità cloud alla rete per migliorare la qualità dei servizi offerti in tempo reale portando la capacità di calcolo ai punti di accesso.

Il Network Function Virtualization[30] (NFV) permette di distribuire le funzioni di rete (firewall, NAT, DPI) come apparecchi virtuali. Questi vengono forniti in modo flessibile al cloud, consentendo così modelli innovativi di fornitura di servizi che migliorano la flessibilità e l'agilità della rete.

Nonostante queste innovazioni, rimane un divario semantico tra le esigenze delle aziende e gli obiettivi dei service provider che devono continuamente adattare e proteggere la rete in un panorama orientato ai servizi.

L'IBN nasce come un approccio nuovo, concepito dall'IETF [31]. Si occupa della gestione della rete per astrarne la complessità permettendo agli utenti finali di concentrarsi sugli obiettivi di performance senza preoccuparsi dei dettagli tecnici.

L'IBN può essere visto come un'evoluzione dell'SDN, poiché incorpora le sue principali caratteristiche superandone alcuni limiti.

Mentre l'SDN fornisce delle northbound APIs che solitamente sono complesse e richiedono la conoscenza di dettagli tecnici di rete [32], IBN, invece, adotta un approccio più astratto in cui gli utenti possono esprimere le proprie esigenze definendo degli intenti, ovvero una serie di obiettivi di alto livello.

Gli intenti sono espressi in un linguaggio naturale che descrive i risultati desiderati lasciando al sistema IBN il compito di tradurli nei dettagli di configurazione. Un intento di rete si riferisce infatti a un livello di astrazione in cui la logica dell'applicazione è espressa in termini di cosa deve essere fatto, utilizzando regole di semantica, piuttosto che di come deve essere implementato [33]. L'idea centrale dell'IBN è di non specificare i dettagli di implementazione della rete; piuttosto, è la rete stessa che deve eseguire le azioni necessarie per soddisfare gli intenti espressi. In questo modo le applicazioni non devono gestire le direttive di rete di basso livello specifiche della tecnologia. Infatti i livelli applicativi possono interagire con l'Intent Layer evitando di apprendere il linguaggio tecnico-specifico del sistema sottostante.

L'approccio IBN è reso possibile grazie la mediazione di un Intent Orchestration Layer, che gestisce e regola il ciclo di vita delle richieste di intenti provenienti dalle applicazioni attraverso operazioni di adempimento e garanzia in un flusso di lavoro a ciclo chiuso. [28]. Queste operazioni, oltre a includere la traduzione e l'eventuale orchestrazione di configurazione per la realizzazione dei singoli intenti, mirano a garantire che la rete rispetti effettivamente l'intento desiderato sulla base della raccolta, aggregazione e valutazione in tempo reale dei dati di monitoraggio.

L'IBN fa uso di un Intent Repository, un database in grado di interagire con i moduli di gestione e traduzione degli intenti per fornire la mappatura tra l'intento e la sua configurazione [34]. Questo paradigma offre vantaggi anche ai fornitori di rete, infatti permette di migliorare l'agilità, la disponibilità e la gestione delle reti a un livello di astrazione più

elevato e verificare continuamente che gli obiettivi siano raggiunti.

## **2.3 Controller allo stato dell'arte**

Prima di analizzare nel dettaglio TeraFlow si introducono due controller che hanno già raggiunto lo stato dell'arte: ONOS e OpenDayLight. Questi controller rappresentano soluzioni già consolidate nel campo del Software Defined Networking e sono ampiamente utilizzati e studiati sia in ambito accademico che industriale. La loro descrizione ci consentirà di mettere in evidenza le differenti caratteristiche per poter analizzare meglio le innovazioni introdotte da TeraFlow.

### **2.3.1 ONOS**

Open Network Operating System (ONOS) [17] è uno dei controller SDN più noti. E' un progetto nato dalla Open Networking Foundation (ONF) [24] al fine di soddisfare le esigenze degli operatori per poter costruire reali soluzioni SDN/NFV. I principali obiettivi sono quelli di introdurre modularità del codice, configurabilità, separazione di interessi e agnosticismo dei protocolli.

Per adattarsi alle esigenze degli utenti è stato necessario poter sviluppare una piattaforma applicativa modulare ed estendibile.

La base dell'architettura di ONOS, come si può vedere dalla Figura 2.2, è costituita da una piattaforma di applicazioni distribuite collocata sopra OSGi [35] e Apache Karaf [36] così da permettere l'installazione e l'esecuzione dinamicamente. Queste applicazioni utilizzano Java come linguaggio di programmazione e offrono delle funzionalità di base e sostegno al livello superiore il quale fornisce una serie di controlli di rete e astrazioni di configurazione necessarie per il corretto funzionamento del controller.

Per estendere le funzionalità, a seconda delle esigenze, sono invece necessarie delle applicazioni ONOS aggiuntive che si comportano come una estensione di quelle già presenti. Ognuna di esse è gestita da un singolo sottosistema che, all'interno del controller, è rappresentato da un modulo. I moduli attualmente installabili che si possono incorporare a quelli inizialmente offerti dal sistema, sono più di 100.



# ONOS Distributed Architecture

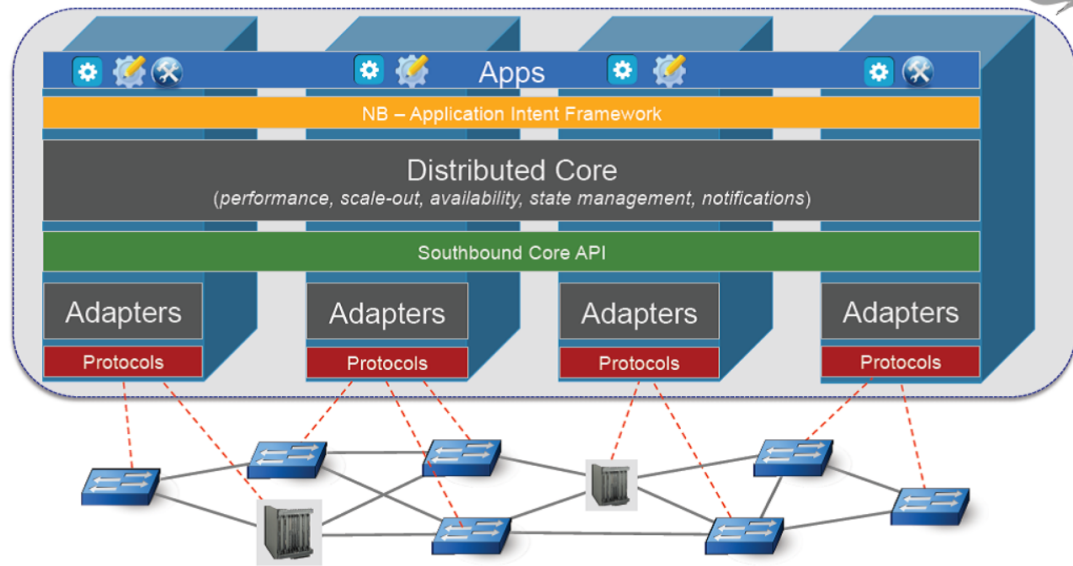


Figura 2.2: Architettura di ONOS [2]

ONOS è stato progettato come un sistema distribuito in cui tutti i nodi del cluster sono equivalenti in termini di funzionalità e capacità software. Ogni nodo può quindi svolgere le stesse operazioni e contribuire in maniera simmetrica al funzionamento del sistema. In caso di guasto di una componente le altre sono quindi in grado di sostenere e mantenere la continuità del servizio, assicurando la disponibilità del sistema.

Pur essendo fisicamente disaggregato offre comunque una visione logicamente centralizzata al fine di fornire l'accesso di ogni informazione alle applicazioni in maniera uniforme. ONOS supporta un'architettura modulare che permette agli operatori di configurare e adattare facilmente la rete alle loro esigenze specifiche garantendo flessibilità e reattività alle variazioni delle condizioni operative.

ONOS supporta diverse API northbound tra cui:

- **GUI:** offre un'interfaccia grafica per interagire con l'utente
- **REST API:** facilita l'integrazione con sistemi di orchestrazione e altri controller
- **gRPC:** per un'interazione ad alte prestazioni tra applicazioni e altre entità o protocolli della piattaforma

Per quanto riguarda le API southbound supportate fornisce diversi adattatori che rendono il sistema indipendente dai vari protocolli.

Abilitando il Transport Layer Security (TLS) per l'interfaccia SBI e l'Hypertext Transfer Protocol Secure (HTTPS) per l'interfaccia NBI, ONOS garantisce una buona sicurezza monitorando e bloccando l'accesso non autorizzato alle risorse in fase di esecuzione [37].

Per la gestione degli intenti ONOS utilizza il framework Intent Monitor and Reroute (IMR) al fine di offrire un sistema dinamico di gestione del traffico. Questo sistema permette di monitorare specifici intenti di rete e ottimizzare l'uso delle risorse in base agli obiettivi definiti dagli utenti.

Un'intento è considerato un sottoinsieme del traffico a cui vengono assegnati valori specifici per ciascun pacchetto. Gli utenti possono quindi definire percorsi ottimali che soddisfino determinati requisiti, come la larghezza di banda o il passaggio attraverso nodi specifici. Per tracciare i percorsi e trovare le destinazioni IMR interagisce con l'Intent Manager e il Flow Rule Manager di ONOS [38].

Un intento passa attraverso tre stati: Not Monitored (non monitorato), To Be Monitored (da monitorare) e Monitored (monitorato). Di default, l'intento è in stato Not Monitored. Quando un'applicazione o un utente richiede il monitoraggio, IMR aggiorna lo stato a To Be Monitored o, se l'intento è già attivo, a Monitored, avviando così la fase di tracciamento delle statistiche. Nel caso in cui l'intento non sia ancora installato, IMR lo inserisce in una lista di attesa fino a quando l'evento di tipo INSTALLED non viene ricevuto dall'Intent Manager, attivando il monitoraggio. In caso di eventi di tipo WITHDRAWN, l'intento viene disattivato [38].

IMR supporta due tipologie di obiettivi: Point-to-point, che stabiliscono una connessione diretta tra nodi, e link collection, che si riferiscono a un insieme di collegamenti monitorati per ottimizzare il traffico e la distribuzione delle risorse.

Una caratteristica chiave è la possibilità di raccogliere statistiche aggiornate per il flusso di rete e gli intenti monitorati consentendo la riconfigurazione dinamica della rete massimizzando l'uso di ciascun collegamento durante la trasmissione dei dati. Queste statistiche possono essere filtrate e rese accessibili agli utenti, tramite API come CLI o REST,

permettendo loro di monitorare la rete e le politiche richieste [39].

### 2.3.2 ODL

OpenDaylight[18] è un progetto open source che utilizza protocolli aperti al fine di fornire controlli centralizzati e gestire il monitoraggio della rete.

Fa parte della fondazione LF Networking [40] che si occupa di fornir supporto a progetti open source volti a migliorare la comunicazione e la gestione dei dati su una rete.

ODL è un framework scritto in Java progettato per soddisfare esigenze specifiche dell'utente e offrire alta flessibilità.

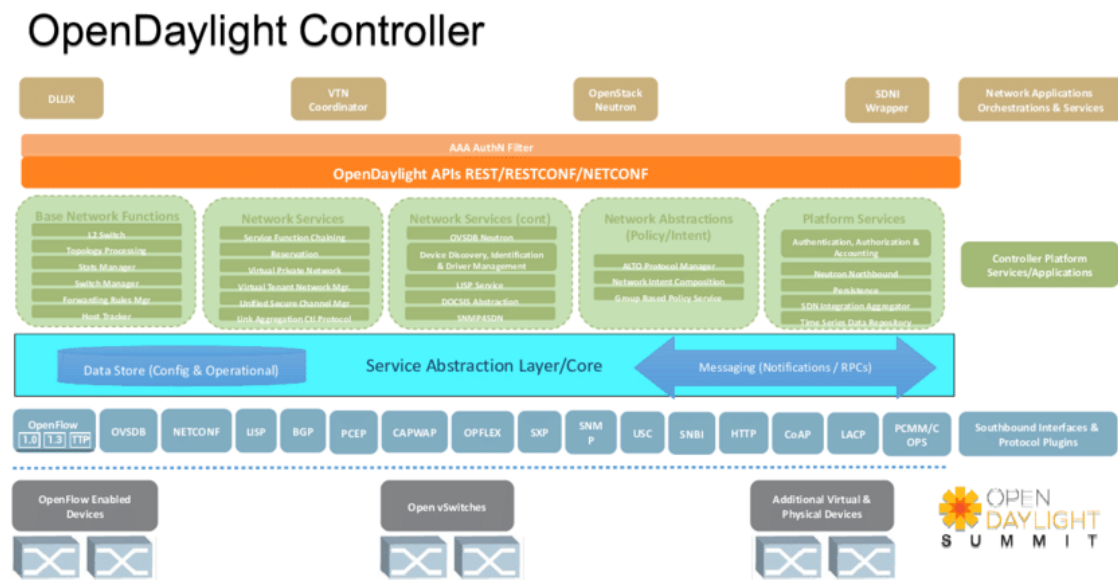


Figura 2.3: Architettura del controller OpenDayLight [3]

L'architettura di OpenDayLight, come mostrato in Figura 2.3, è su più livelli [41]. Il livello principale è costituito dal Controller Platform in quanto al suo interno risiede il controller stesso, il quale si occupa di gestire il flusso di traffico andando a modificare le tabelle di inoltro dei dispositivi fisici o virtuali.

Un aspetto rilevante dell'architettura è la presenza di microservizi che l'utente può attivare o disattivare in base alle proprie esigenze. Di default sono tutti disabilitati offrendo un alto

livello di personalizzazione.

I microservizi sono implementati come moduli all'interno del controller, e possono essere collegati tra loro per eseguire diverse attività di rete.

Il Service Abstraction Layer (SAL) è il livello inferiore che si occupa di offrire supporto ai vari protocolli SBI come OpenFlow o NETCONF offrendo un'interfaccia tra il piano dati e il piano di controllo. All'interno di questo livello il collegamento dei moduli tra il controller e i dispositivi avviene dinamicamente al fine di soddisfare il servizio richiesto indipendentemente dal protocollo utilizzato.

Per la gestione dei moduli a runtime e l'installazione di nuove funzionalità da implementare nel software di ODL viene utilizzato Apache Karaf [36].

Karaf fornisce un ambiente modulare in cui è possibile implementare e aggiornare le funzionalità senza interrompere il funzionamento del controller. Grazie al framework Model-Driven Service Abstraction Layer (MD-SAL), gli sviluppatori possono creare nuove funzionalità sotto forma di servizi e protocolli interconnessi. Il controller espone delle API NBI di supporto alle applicazioni tra cui il framework OSGi [35], per gestire le applicazioni che girano all'interno del controller, e REST per la comunicazione con le applicazioni esterne [42].

Per risolvere i problemi legati alla scalabilità, disponibilità e persistenza dei dati, ODL può essere distribuito in più istanze su macchine diverse, le quali cooperano tra loro tramite un meccanismo di clustering.

ODL per gestire gli intenti aveva messo a disposizione il Network Intent Composition (NIC), una NorthBound Interface che è stata abbandonata a partire dalle release successive a Oxygen nel 2018.

Network Intent Composition (NIC) [43] è un'interfaccia progettata per consentire agli utenti di esprimere uno stato desiderato in modo indipendente dall'implementazione sottostante, detto intento. Ciò è possibile grazie all'Intent Compilation Engine che ha il compito di convertire e tradurre gli intenti in regole di configurazione concrete per il protocollo di controllo sottostante (come OpenFlow, SNMP, NETCONF..), utilizzando le risorse di rete disponibili. Questo garantisce che le richieste siano trasformate in comandi eseguibili

sui dispositivi di rete, sia fisici che virtuali.

Una delle caratteristiche centrali di NIC è l'utilizzo di un linguaggio di programmazione degli intenti che permette di utilizzare una varietà di linguaggi di policy e di programmazione SDN per consentire di descrivere in modo flessibile il comportamento desiderato della rete offrendo un approccio descrittivo.

Grazie alla funzione di composizione degli intenti, NIC consente di combinare più richieste di politiche provenienti da varie applicazioni SDN in un insieme coerente di azioni, gestendo i conflitti tra politiche diverse e garantendo coerenza nelle operazioni di rete.

Per la gestione delle politiche NIC impiega diversi database logici di informazioni tra cui: il Network Service Intent DB per le politiche relative ai servizi di rete, l'End Point Intent DB per politiche sugli endpoint, il Network Security Intent DB per le politiche riguardanti la sicurezza della rete. Oltre a questi, altri database descritti in [44], supportano altre tipologie di politiche, garantendo una gestione completa delle esigenze.

Dal punto di vista dell'interoperabilità, NIC è progettato per essere indipendente dal controller e dal protocollo di rete, permettendo la portabilità degli intenti tra diverse implementazioni di controller. Gli utenti possono interagire con NIC attraverso l'interfaccia RESTful utilizzando operazioni standard RESTCONF oppure tramite la Karaf console CLI.

Le operazioni REST supportate includono [43]:

- POST: per creare un nuovo intento, specificandone l'ID come attributo.
- GET: per recuperare la lista degli intenti configurati o un intento specifico.
- DELETE: per rimuovere un intento configurato dalla rete.

Attualmente, ODL gestisce gli intenti utilizzando il framework MD-SAL e applicazioni di rete che interagiscono tramite API come REST o NETCONF. Senza una specifica interfaccia dedicata, gli intenti vengono espressi e gestiti attraverso una combinazione di applicazioni e protocolli che traducono i requisiti dell'utente in configurazioni di rete concrete.

## 2.4 Kubernetes

Kubernetes [45], noto anche come K8s, è una piattaforma open-source per l'orchestrazione dei container. Creato originariamente da Google nel 2014, è stato poi donato alla Cloud Native Computing Foundation (CNCF [46]).

E' progettato per automatizzare la gestione, lo scaling e il deployment di applicazioni containerizzate. Quest'ultime vengono eseguite all'interno dei cluster Kubernetes costituiti da

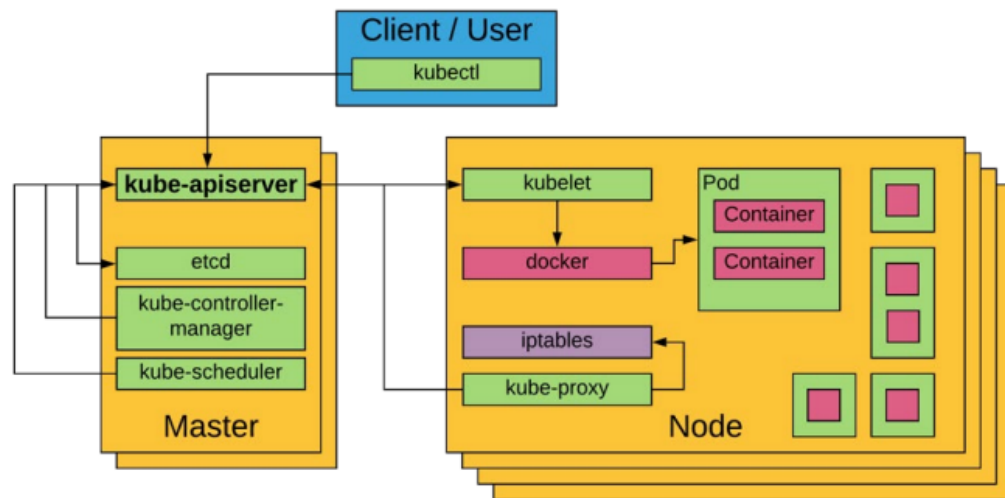


Figura 2.4: Architettura di Kubernetes [4]

macchine fisiche o virtuali chiamate nodi. I cluster comprendono due tipologie principali di macchine: il Master, che gestisce l'intera orchestrazione, e i Nodi, che eseguono i container all'interno di pod che condividono risorse come CPU e memoria. Le risorse dei cluster vengono specificate attraverso file di configurazione, tipicamente utilizzando YAML (Yet Another Markup Language), consentendo agli utenti di specificare deployment, servizi e configurazioni necessarie all'esecuzione delle applicazioni.

Kubernetes segue un'architettura basata sul paradigma client-server (raffigurata in Figura 2.4), con i pod come unità di base, il Master che agisce da server centrale e i Nodi che rappresentano i client. Ogni Nodo esegue due servizi principali: il kubelet, che riceve e gestisce i comandi per l'esecuzione dei container, e il kube-proxy, che si occupa della

configurazione delle regole di rete garantendo che le connessioni siano correttamente instradate verso i pod. Il Master è responsabile del coordinamento del cluster, e ciò avviene tramite alcuni componenti essenziali [4]:

- **etcd**: un database distribuito che memorizza lo stato del cluster.
- **kube-apiserver**: fornisce l'interfaccia di comunicazione tra i componenti interni al sistema e gli utenti esterni.
- **kube-controller-manager**: monitora lo stato delle risorse del cluster e applica le modifiche necessarie.
- **kube-scheduler**: decide su quali nodi eseguire i pod in base alle risorse disponibili.

In Kubernetes è possibile avere più di un Master per migliorare la disponibilità del sistema utilizzando un Master principale e dei nodi replica che garantiscano la continuità del servizio in caso di guasto.

Un aspetto fondamentale di Kubernetes è la caratteristica di self-healing; se un processo si arresta o un pod fallisce, Kubernetes è in grado di riavviarlo automaticamente. Ciò permette alle applicazioni di rimanere sempre in uno stato ottimale. Inoltre, durante gli aggiornamenti, Kubernetes utilizza il meccanismo di rolling update (aggiornamenti in sequenza): i pod vengono aggiornati uno alla volta, garantendo che il numero richiesto rimanga sempre attivo e in esecuzione, senza provocare interruzioni del servizio.

Oltre alle funzionalità di base, Kubernetes offre concreti vantaggi operativi, soprattutto in termini di ottimizzazione delle risorse. Grazie alla capacità di distribuire le applicazioni containerizzate in modo efficiente su un numero limitato di macchine è possibile ridurre i costi legati all'infrastruttura. Questo porta a un utilizzo più vantaggioso delle risorse hardware, limitando il tempo in cui le macchine restano inattive e riducendo il consumo energetico [47]. Anche TeraFlow adotta Kubernetes per orchestrare le sue componenti. Ciò permette a TeraFlow di gestire dinamicamente i suoi servizi e adattarsi rapidamente alle esigenze di rete, garantendo funzionalità come autoriparazione, integrità e bilanciamento del carico [48]

## 2.5 Microservizi

I microservizi rappresentano un nuovo paradigma di progettazione software che si basa sulla scomposizione di applicazioni in una serie di servizi autonomi, chiamati microservizi. Ogni microservizio ha un obiettivo specifico e può essere gestito in modo indipendente dagli altri mantenendo comunque la capacità di comunicare tramite protocolli standardizzati.

La loro introduzione è stata motivata dalle limitazioni delle architetture monolitiche, che sono diventate più evidenti con l'aumento della complessità delle applicazioni moderne. Nelle architetture monolitiche, l'intera applicazione è costituita da un unico blocco di codice in cui tutte le funzionalità, indipendentemente dal loro grado di correlazione, sono strettamente interconnesse. Ciò rende complessa la gestione e l'evoluzione nel tempo. Ad esempio, l'aggiunta di nuove funzionalità o la risoluzione di errori può richiedere modifiche di un'ampia porzione di codice, aumentando il rischio di introdurre nuovi errori in altre parti dell'applicazione. Inoltre, il lavoro degli sviluppatori è spesso vincolato a un unico repository e a un linguaggio di programmazione scelto inizialmente, limitando il processo di sviluppo e l'autonomia. Ciò introduce un rallentamento del ciclo di aggiornamento, poiché anche piccole modifiche richiedono spesso la ricompilazione dell'intero sistema. Dal punto di vista della scalabilità, le applicazioni monolitiche mostrano ulteriori limiti. Per gestire l'incremento delle richieste, l'intera applicazione deve essere replicata, anche quando l'aumento del carico riguarda solo componenti specifici. Ciò porta a un uso inefficiente delle risorse e a un incremento dei costi di gestione.

L'architettura a microservizi risolve molti di questi problemi. Essa scompone il sistema in moduli più piccoli e indipendenti, facilitando la manutenibilità e permettendo una gestione più agile delle risorse.

Gli aspetti chiave si possono riassumere in [49]:

- **Flessibilità:** il sistema può evolvere in modo continuo, facilitando l'adozione di nuove funzionalità.
- **Modularità:** il sistema è composto da servizi indipendenti, ognuno dei quali con-



tribuisce al comportamento generale.

- **Evoluzione:** l'introduzione di nuove funzionalità avviene in modo graduale, riducendo il rischio di errori e semplificando la manutenzione.

In particolare, i microservizi influenzano diversi attributi fondamentali per la qualità del software [49]:

- **Disponibilità:** essendo ogni servizio autonomo, la disponibilità del sistema dipende da quella dei singoli servizi. E' tuttavia necessario mantenere un bilanciamento nella complessità di integrazione che può portare a una riduzione dell'affidabilità del sistema.
- **Affidabilità:** l'affidabilità complessiva è strettamente collegata ai meccanismi di comunicazione tra i servizi che devono essere quindi progettati con particolare attenzione introducendo interfacce semplici.
- **Manutenibilità:** l'indipendenza dei servizi riduce i costi di modifica e facilita l'aggiunta di nuove funzionalità
- **Prestazioni:** la comunicazione tra microservizi avviene tramite la rete, e questo può comportare un degrado delle prestazioni rispetto alle chiamate interne delle architetture monolitiche. Tuttavia, un sistema ben progettato con contesti definiti e una giusta interconnessione può minimizzare questo impatto.
- **Sicurezza:** l'utilizzo di formati di scambio dati introduce la necessità di meccanismi di crittografia e autenticazione, specialmente quando si integrano servizi di terze parti
- **Testabilità:** uno dei principali vantaggi dei microservizi è la possibilità di testare ogni componente in isolamento, facilitando la rilevazione degli errori. E' necessaria una particolare attenzione all'integrazione tra più microservizi che può risultare complessa e creare delle anomalie non presenti nei singoli componenti.

Nonostante alcune sfide, i microservizi offrono vantaggi significativi alle aziende e, pur essendo un paradigma relativamente nuovo, è già ampiamente diffuso. Un'indagine del

2021 ha infatti rivelato che il 71% delle imprese adottava almeno parzialmente i microservizi [50].

Inoltre, sistemi monolitici preesistenti possono essere gradualmente trasformati in un'architettura di microservizi. Un esempio noto è quello di Amazon, che ha abbandonato un database monolitico a favore una struttura basata sui microservizi. Altre aziende come Netflix, Uber e LinkedIn li hanno adottati riscontrando un miglioramento nei loro tempi di rilascio.

Nel contesto delle applicazioni cloud-native, i microservizi svolgono un ruolo centrale. In un'architettura basata su microservizi orchestrata da Kubernetes, come TeraFlow, ogni microservizio è isolato in un container che può avere più istanze, ognuna rappresentata da un pod. Questo consente una gestione delle risorse più efficiente rispetto alle macchine virtuali (VM) tradizionali, dove ogni istanza necessita di un sistema operativo completo e facilita operazioni di aggiornamento o ripristino [51], oltre a ridurre il consumo di risorse condividendo librerie e componenti.

### 3. TeraFlow: architettura e gestione degli intenti

Il controller SDN su cui ci focalizzeremo è TeraFlow [52], una piattaforma innovativa e recentemente proposta, sviluppata da un'ampia comunità open source nell'ambito di un progetto europeo.

Infatti, è stato finanziato dall'unione europea per il programma di ricerca e innovazione Horizon 2020 [53] e supportato dal 5G PPP [54], un'iniziativa congiunta tra la Commissione Europea e l'industria europea delle telecomunicazioni.

Nonostante la quantità di controller SDN i fondatori di TeraFlow hanno riscontrato come problema comune il calo delle contribuzioni negli ultimi anni ai progetti. Questo declino mette a rischio il continuo sviluppo e il supporto per i nuovi bisogni delle reti moderne lasciando molte soluzioni esistenti inadeguate per affrontare le sfide emergenti.

L'obiettivo di TeraFlow è implementare un controller SDN Carrier Grade (reti o infrastrutture ben testate con livelli estremamente elevati di affidabilità, ridondanza e sicurezza) che soddisfi i requisiti attuali ed eventualmente futuri per le reti, sia architetturali che infrastrutturali, e che sia in grado di gestire miliardi di dispositivi. Il controller mira a migliorare le capacità di elaborazione dei flussi permettendo di gestire un volume di traffico equivalente a un terabit al secondo. Questa capacità è cruciale per supportare le elevate esigenze di connettività delle reti B5G.

Un ulteriore obiettivo è ridurre il divario tra le necessità delle industrie e ciò che offrono gli standard SDN.

Questo controller, attualmente in fase di sviluppo, sarà progettato per integrarsi con gli attuali framework NFV e MEC. Inoltre, si prevede che supporti l'integrazione delle apparecchiature di rete ottica e a microonde e che sarà compatibile con altri controller come ONOS, ma anche con istanze multiple di TeraFlow che gestiscono diversi domini, al fine di sfruttare funzionalità avanzate e facilitare l'interoperabilità con altre reti.

A differenza dei controller presentati precedentemente TeraFlow è stato progettato con un'architettura cloud-native, pensata per sfruttare appieno le caratteristiche degli ambienti cloud. Questo approccio, basato su microservizi containerizzati, garantisce una maggiore

flessibilità e capacità di adattamento rispetto ai sistemi tradizionali.

L'uso di container, gestiti tramite Kubernetes, permette di isolare ogni microservizio utilizzando una minore quantità di risorse rispetto alle macchine virtuali (VM).

TeraFlow infatti mira a ottimizzare l'uso delle risorse di rete per migliorare l'efficienza energetica e ridurre i costi operativi. Ciascun microservizio rappresenta una componente che interagisce attraverso la connessione di rete rendendo il controller disaggregato. Le componenti principali del sistema sono implementate in Java (solo quelle di Automation e Policy) e Python e l'ambiente è sviluppato presso la sede del CTTC a Barcellona.

Alcuni dei requisiti funzionali del controller sono rappresentati da [55]:

- **usabilità:** realizzata grazie a un'interfaccia utente web (web UI) che consente la configurazione di servizi predefiniti e visualizzazione personalizzabile delle metriche.
- **scalabilità:** è intrinseca nel design del controller con la replicazione automatica dei microservizi per gestire elevati volumi di richieste in ingresso.
- **affidabilità:** garantita attraverso robusti meccanismi di monitoraggio che supervisionano lo stato dei microservizi e dei flussi, attivando automaticamente dei processi di ripristino se necessari.

Dal punto di vista della sicurezza il sistema utilizza un approccio basato sul Machine Learning per la prevenzione e la mitigazione degli attacchi.

Questo progetto riveste un ruolo chiave nel panorama delle tecnologie 5G, contribuendo a unire diverse università e istituti di ricerca per sviluppare soluzioni all'avanguardia lavorando con organismi di standardizzazione per garantire l'adozione su scala globale.

### 3.1 Componenti architetturali

Le componenti di TeraFlow sono classificate in due categorie; le componenti principali del sistema operativo e le netapp sovrapposte [56]. Le componenti del sistema operativo di rete (Network Operating System - NOS) formano la base dell'infrastruttura di TeraFlow,

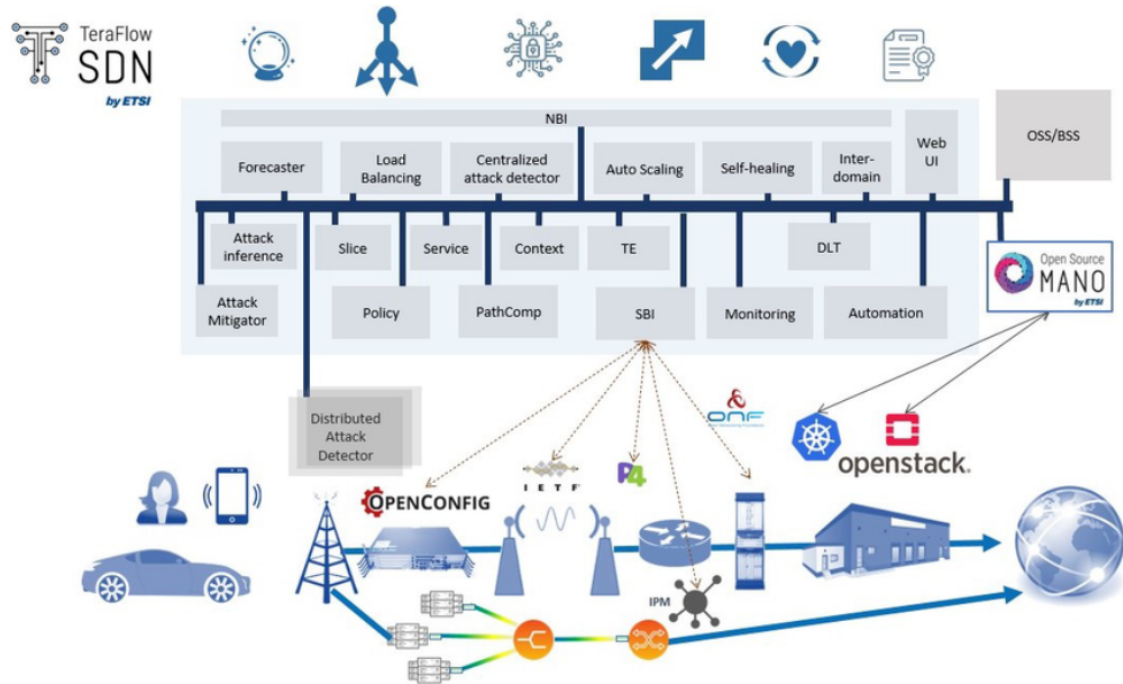


Figura 3.1: Architettura di TeraFlow [5]

illustrata in Figura 3.1, offrendo servizi di connettività per infrastrutture di rete programmabili avanzate [56] basate su tecnologie come P4 (Programming Protocol-independent Packet Processors), OpenConfig e TAPI (Transport API), che forniscono modalità flessibili per gestire il traffico e le configurazioni di rete. Una delle componenti principali per questa gestione è quella di Context. Ha il compito di memorizzare topologie, dispositivi, collegamenti e servizi in un database No-SQL[57]. Questa componente garantisce la coerenza dei dati gestiti, controllando gli accessi concorrenti dei vari componenti del controller SDN [58], grazie a una Database API.

Le netapp sovrapposte sono applicazioni che operano sopra il livello del NOS, sfruttando le interfacce di comunicazione, indipendentemente dal linguaggio di programmazione, per interagire con le infrastrutture di rete. Queste applicazioni possono includere strumenti per il monitoraggio, la gestione della qualità del servizio, e altre funzionalità.

TeraFlow fornisce, inoltre, soluzioni di automazione SDN e IBN basate su policy. Nello specifico, TeraFlow Automation sfrutta importanti eventi di sistema per realizzare la

(ri)configurazione di servizi e dispositivi in modo zero-touch, ossia minimizza l'intervento umano attraverso l'automazione. Riducendo la necessità di interventi manuali da parte degli operatori vengono ridotte significativamente anche le spese operative [56].

Alcune componenti di TeraFlow sono suddivise in livelli di astrazione per facilitare la gestione della rete:

- **Device Level Abstraction:** fornisce un'astrazione dei dispositivi fisici presenti, consentendo al controller di interagire con diverse tipologie di hardware.
- **Service Level Abstraction:** focalizzato sulla gestione e configurazione dei servizi, questo livello gestisce le interazioni con l'SBI (Southbound Interface) per fornire un'interfaccia unificata.
- **Management Level Abstraction:** realizza la gestione complessiva della rete, che include il monitoraggio, il controllo e la manutenzione dei servizi e dei dispositivi gestiti tramite SBI, garantendo un controllo centralizzato dell'infrastruttura.

Nelle sezioni successive saranno descritte le componenti rilevanti per la sperimentazione. La definizione delle rimanenti si può trovare nella documentazione ufficiale [6].

### **3.1.1 Device Level Abstraction**

Il Device Level Abstraction permette l'interazione con i dispositivi presenti all'interno della rete e corrisponde all'Infrastructure layer descritto nell'architettura SDN.

Una componente fondamentale per questo livello di astrazione è la componente SBI (Southbound Interface), che permette al controller di interagire con diversi tipi di dispositivi, garantendo eterogeneità attraverso il supporto a vari protocolli. Il ruolo principale dell'SBI è stabilire e mantenere la connessione con i dispositivi, consentendo la loro integrazione nell'ecosistema del controller e la configurazione dinamica a tempo di esecuzione [6]. Dopo aver stabilito la connessione con un determinato dispositivo e aver verificato la disponibilità, la componente mette a disposizione una API che consente di inviare le configurazioni dal controller al dispositivo in formato JSON. Queste configurazioni permettono di aggiornare i parametri operativi del dispositivo in base alle politiche di rete definite.

Un'altra componente che fa parte di questo livello è quella di Monitoring il cui compito è offrire supporto al Management-level per l'automazione dei servizi e per prendere le decisioni in tempo reale sulla base di eventi.

La componente di Monitoring gestisce le diverse metriche configurate, per i dispositivi e i servizi di rete, memorizzando i dati di monitoraggio relativi alle Key Performance Indicators (KPI) selezionate, persistendo le informazioni all'interno di un database (Metrics Database). Questo permette di fornire dati dimensionali con serie temporali visualizzabili su Grafana [59]. Per il corretto funzionamento la componente di Monitoring deve essere in grado di recuperare le metriche da tutti i diversi dispositivi monitorati. Questi implementano spesso protocolli diversi per notificare le KPI, per questo motivo sono stati inclusi una serie di sottomoduli che si connettono agli elementi monitorati utilizzando i protocolli SBI necessari. Quando un valore KPI registrato supera determinate soglie predefinite, la componente di Monitoring invia una notifica dell'evento alla componente responsabile della gestione di quel servizio specifico, ossia quella che ha originariamente richiesto il monitoraggio della metrica all'interno del controller.

Ogni evento è composto da una KPI che identifica la regola a cui si riferisce, un timestamp e un KPIValue, che rappresenta il valore della metrica monitorata in tempo reale richiesta dalla KPI al momento specificato dal timestamp. Supponendo che la componente di Monitoring stia monitorando la latenza di un collegamento di rete tramite una KPI denominata "Latency" e che la latenza massima accettabile sia 100ms, se la latenza supera questa soglia, ad esempio 120ms, viene generato un evento così composto:

- KPI: "Latency"
- Timestamp: "06-09-2024 14:35:20" (la data e l'ora a cui si è verificato l'evento)
- KPIValue: 120 ms

Quanto si tratta di gestire topologie più complesse che coinvolgono molti dispositivi è necessario un livello di astrazione superiore per specificare la connessione tra vari end-points senza la necessità di configurare singolarmente ogni dispositivo. A tal fine si introduce il Service-level.

### 3.1.2 Service Level Abstraction

Il Service Level è responsabile della creazione e dell'aggiornamento dei servizi di rete. Questo livello di astrazione permette agli utenti di definire intenti specifici per la connessione tra gli end-points attraverso la componente di Service.

Per svolgere questo compito, la componente si avvale di diverse funzionalità offerte dalle altre parti del sistema. In particolare, per il calcolo dei percorsi di rete, si affida alla componente PathComp (Path Computation). Ad esempio, se un intento richiede la creazione di una connessione con una latenza minima tra due nodi specifici, la componente invia una richiesta alla PathComp, che calcola il percorso ottimale in base ai valori della latenza. Una volta ricevuta la risposta, la componente di Service utilizza uno scheduler per configurare i dispositivi di rete lungo il percorso selezionato, utilizzando le connessioni restituite [6]. Le specifiche configurazioni vengono propagate all'interfaccia Southbound (SBI) attraverso dei file JSON, consentendo un'automatizzazione della rete e permettendo di astrarre la complessità del livello sottostante all'utente.

La componente di Service supporta diversi tipi di servizi ed è in grado di utilizzare vari protocolli. Implementa a tale scopo una Service Handler API che consente agli operatori di rete di definire i comportamenti necessari per ciascun tipo di servizio [6].

- **L2-VPN**: servizio per dispositivi OpenConfig
- **L3-VPN**: servizio per dispositivi emulati o OpenConfig con supporto per ACLs
- **Connectivity**: servizio per dispositivi TAPI
- **L2 service Handler**: servizio per dispositivi P4
- **Microwave service Handler**

Un'altra componente che fa parte di questo livello è la PathComp. Questa, come accennato in precedenza, si occupa di gestire la selezione del percorso tra gli end-points per i servizi di connettività di rete. Riceve richieste dalla componente di Service e, interagendo con la componente di Context, recupera le informazioni sulle topologie sottostanti al fine di creare percorsi che soddisfino i requisiti richiesti.



La PathComp rappresenta un'entità singola e specializzata dove possono essere ospitati diversi algoritmi. Questo permette che qualsiasi nuovo algoritmo utilizzato non impatti su altre componenti del controller. Per confrontare i percorsi viene utilizzato inizialmente un algoritmo K-SP dove i k percorsi sono ordinati per numero di passi (hop), ritardo end-to-end e larghezza di banda disponibile sul link più congestionato [60].

Il service layer permette al controller di tradurre gli intenti in regole concrete che vengono poi propagate al livello sottostante tramite l'SBI. Tuttavia, da solo non ha la capacità di rispondere dinamicamente agli eventi che si verificano nella rete in tempo reale, come il cambiamento dello stato di un collegamento o di una risorsa di rete. Per essere in grado di creare, aggiornare o cancellare i servizi di rete in base a tali eventi è necessario introdurre un ulteriore livello di astrazione che automatizzi queste operazioni: il Management Level Abstraction.

### **3.1.3 Management Level Abstraction**

Questo livello di astrazione è stato introdotto per consentire l'interazione dinamica con la componente di Service permettendo l'automazione di un servizio in risposta agli eventi provenienti dalla rete. In altre parole, il sistema non si limita a configurare i dispositivi solo su input manuali o su richiesta esplicita, ma è in grado di adattarsi dinamicamente ai cambiamenti dello stato della rete in tempo reale. Questo livello consente dunque al controller di reagire rapidamente a eventi come congestioni, guasti o modifiche nella topologia, garantendo che la rete mantenga un alto livello di efficienza e affidabilità.

Una delle componenti fondamentali è la componente di Policy, che interagisce strettamente con la componente Monitoring descritta precedentemente.

Si occupa di definire condizioni di politica che possono essere applicate sia a livello di singoli dispositivi che a livello di dominio della rete. Le politiche possono includere più regole collegate tra loro tramite condizioni logiche di AND/OR [6], ognuna delle quali genera una KPI specifica da far monitorare alla componente di Monitoring.

Ogni regola è composta, oltre che dalla KPI che la identifica, da un operatore numerico di confronto (maggiore, minore o uguale), e da un KPIValue. Quest'ultimo, in combinazione con l'operatore numerico, definisce l'intervallo di valori accettabili o non accettabili per

quella specifica metrica.

Se le regole definite nella politica vengono soddisfatte la componente di Monitoring genera un allarme che viene inviato, in questo caso, alla componente di Policy, che reagisce attivando le azioni predefinite. Ad esempio, se si verifica un eccesso di latenza, la componente di Policy può attivare il ricalcolo del percorso tramite la componente di Service o altre azioni correttive, consentendo di ripristinare lo stato desiderato.

La componente Policy utilizza il Context Database per identificare quali dispositivi o servizi sono coinvolti nella politica. Se viene fornito l'ID del servizio, la componente recupera i dispositivi associati a esso, in caso contrario scansiona una lista di dispositivi per individuare quelli che devono rispettare le regole impostate.

Una regola di politica può avere vari stati che possono essere rappresentati tramite la macchina a stati in Figura 3.2:

- **inserted** (inserita)
- **validated** (convalidata)
- **provisioned** (provvista)
- **actively enforced** (attivamente applicata)
- **failed** (fallita)
- **updated** (aggiornata)
- **removed** (rimossa)

Grazie all'integrazione tra la componente di Policy e Monitoring, TeraFlow ha reso possibile l'associazione delle condizioni di politica con gli allarmi del sistema di Monitoring. In questo modo può implementare una gestione dinamica della rete permettendo di mantenere gli SLA (Service Level Agreements) senza necessitare di interventi manuali continui da parte degli operatori riducendo anche la complessità operativa. In ambienti su larga scala, come le reti distribuite composte da microservizi, questa capacità di adattamento consente anche di prevenire potenziali criticità, ottimizzando continuamente le risorse di rete.

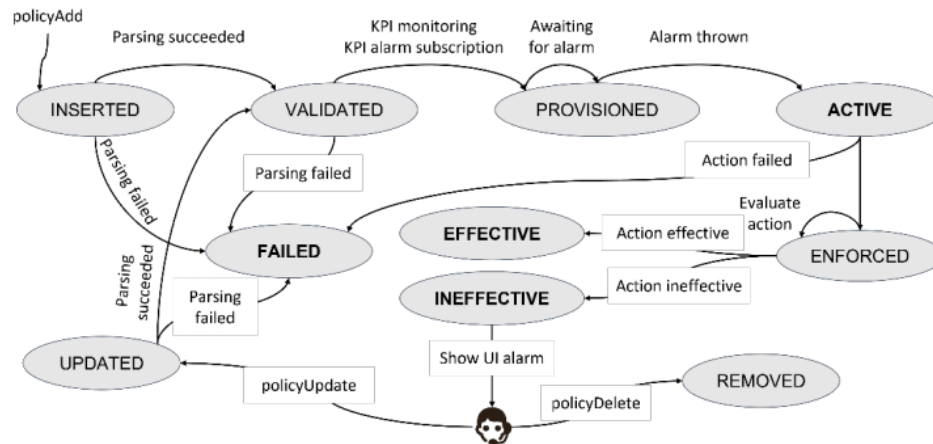


Figura 3.2: Macchina a stati interna alla componente di policy [6]

## 3.2 gRPC

Per garantire l'interoperabilità tra le diverse componenti, TeraFlow utilizza un bus gRPC (Google Remote Procedure Call [61]) come protocollo interno, un framework che facilita la comunicazione tra servizi in modo efficiente e preciso.

Inizialmente i più popolari protocolli inter-processo erano basati sul paradigma RPC (Remote Procedure Call) [7]. Esso utilizza uno scambio di messaggi con le caratteristiche di basso sovraccarico, semplicità e trasparenza. Per questi motivi è stato ampiamente usato per diverso tempo in sistemi applicativi distribuiti. Con RPC un client può invocare da remoto una funzione di un metodo chiamandola come se fosse una procedura locale [62]. Tuttavia, la maggior parte delle convenzionali implementazioni (un esempio è RMI) sono complesse dato che richiedono una gestione diretta dei protocolli di trasporto, come TCP, che ostacolano l'interoperabilità e richiedono specifiche eccessive [7].

Google Remote Procedure Calls (gRPC[61]) è un framework OpenSource sviluppato da Google. Permette di connettere, invocare, operare e fare debug di programmi eterogenei in modo semplice.

gRPC è basato sul protocollo di trasporto HTTP/2 che supporta la comunicazione bidirezionale. Sebbene anche gRPC utilizzi TCP la differenza con i tradizionali protocolli RPC

risiede nelle caratteristiche avanzate di HTTP/2 che includono funzionalità come il multiplexing delle connessioni, il flusso bidirezionale e una migliore gestione delle prestazioni. gRPC include supporto per il bilanciamento del carico, il tracciamento, il controllo dello stato e l'autenticazione[63] [64].

Consente di definire i servizi, i loro metodi di comunicazione e trasportare messaggi attraverso dei file di descrizione dell'interfaccia detti Protocol Buffer, o più semplicemente file proto.

I file proto sono un meccanismo indipendente dal linguaggio e dalla piattaforma e permettono di serializzare le strutture dati in modo più efficiente rispetto a formati come JSON o XML, sia in termini di dimensione dei messaggi che di velocità di elaborazione. In Figura

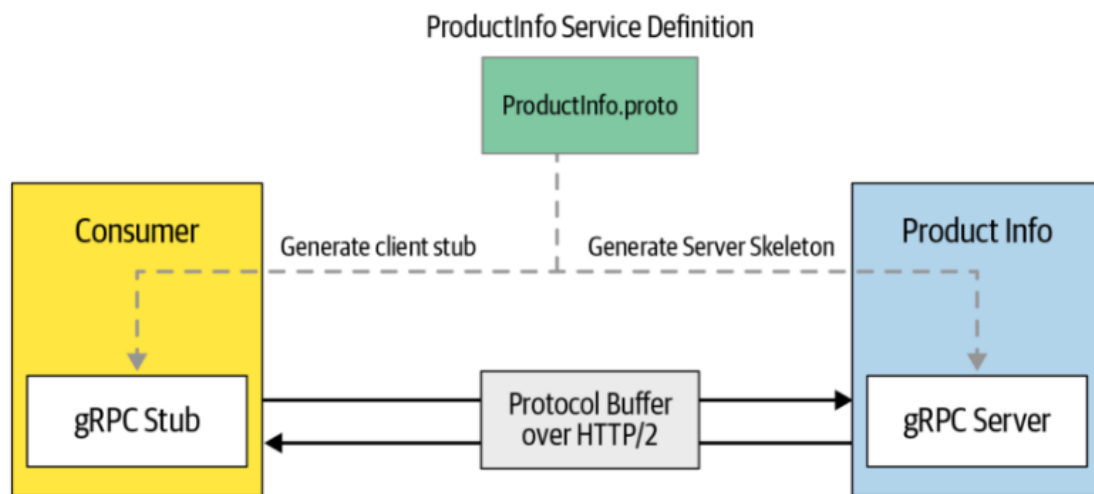


Figura 3.3: Funzionamento del protocollo gRPC [7]

3.3 viene illustrata l'interazione tra un microservizio e un client tramite gRPC.

Per sviluppare un'applicazione gRPC è necessario definire un'interfaccia dei servizi all'interno di un file proto (in Figura 3.3 ProductInfo.proto). Anche se a prima vista può sembrare un file di testo ordinario, come si può notare in Figura 3.4, in realtà specifica i metodi con i parametri di input e i valori di ritorno. Tutti i Protocol Buffers utilizzati da TeraFlow sono descritti nella pagina del sito [8].

Una volta definita l'interfaccia è possibile generare il codice per il server (server skeleton) e per il client (client stub) nel linguaggio desiderato usando il compilatore Protobuf *pro-*

```

20 service ForecasterService {
21     rpc GetForecastOfTopology (context.TopologyId) returns (Forecast) {}
22     rpc GetForecastOfLink(context.LinkId) returns (Forecast) {}
23     rpc CheckService (context.ServiceId) returns (ForecastPrediction) {}
24 }
25
26 message SingleForecast {
27     context.Timestamp timestamp= 1;
28     double value = 2;
29 }
30
31 message Forecast {
32     oneof uuid {
33         context.TopologyId topologyId= 1;
34         context.LinkId linkId = 2;
35     }
36     repeated SingleForecast forecast = 3;
37 }
38
39 enum AvailabilityPredictionEnum {
40     FORECASTED_AVAILABILITY = 0;
41     FORECASTED_UNAVAILABILITY = 1;
42 }

```

Figura 3.4: Esempio di Protocol Buffer file in TeraFlow [8]

*toc*[7]. Ciò permette al client di invocare i metodi definiti da remoto.

Quando il client richiede un servizio gRPC, utilizza i protocol buffer per serializzare la chiamata in un formato compatibile con il protocollo. Successivamente, la richiesta viene inviata tramite HTTP/2 e, una volta ricevuta dal server, viene deserializzata, con il supporto dei Protocol Buffers, per invocare il metodo appropriato. La risposta segue il flusso inverso da server a client[7].

Il framework gRPC semplifica quindi la gestione di aspetti complessi come vincoli di servizio, serializzazione dei dati, comunicazioni di rete e autenticazione. E' progettato per trasportare messaggi peer-to-peer in modo distribuito e non durevole, consentendo a più servizi di scambiarsi informazioni attraverso un bus condiviso. Questo lo rende particolarmente adatto per architetture basate su microservizi, come TeraFlow, dove scalabilità e prestazioni sono fondamentali.

Negli esperimenti svolti in [65] si è dimostrato che gRPC, grazie ai file proto, in scenari

che coinvolgono ambienti più complessi con molte componenti (come server, DNS, firewall..) può portare a una riduzione di quasi il 27% nel tempo di creazione del server rispetto a REST (Representational State Transfer), uno tra i più moderni e utilizzati sistemi di trasmissione dati, riducendo il tempo di esecuzione complessivo. Infine, gRPC supporta nativamente TLS (Transport Layer Security), che garantisce la sicurezza delle comunicazioni cifrando i messaggi scambiati tra servizi. Questo aspetto è cruciale per assicurare la protezione dei dati in sistemi distribuiti e critici.

## 4. Studio e sperimentazione della gestione di policy in Teraflow

In questo Capitolo verranno esposti i vari esperimenti eseguiti utilizzando il controller SDN TeraFlow per quanto riguarda la gestione degli intenti. Nella fase iniziale si è seguito l’Hackfest 3 [66] dove è stato fornito un ambiente pre-configurato per testare TeraFlow SDN. Il lavoro è iniziato con l’installazione della macchina virtuale [67] creata appositamente per il congresso.

Di seguito vengono riportate le specifiche della VM utilizzata:

- IP Address: 10.0.2.X/24 (DHCP)
- Gateway: 10.0.2.1
- DNS: 8.8.8.8, 8.8.4.4
- Creata con VirtualBox 6.1 ma compatibile con versioni successive
- Requisiti minimi: 4 vCPU, 6 GB di RAM, 50 GB di spazio sul disco, Virtual Disk Image (VDI)
- Connessione di rete: NAT Network con porte esposte 22 per SSH e 80 per HTTP
- Sistema operativo senza interfaccia grafica per ridurre il consumo di risorse.

La VM ha al suo interno preinstallati MicroK8s con le componenti richieste e Mininet in formato docker. La versione di TeraFlow utilizzata è la 2.1 con adattamenti specifici per l’Hackfest.

Successivamente è stata installata la VM con la versione aggiornata di TeraFlow (3.0) a causa di un’incompleta implementazione della componente di Policy che non era in grado di gestire e riconoscere le KPI. Le caratteristiche richieste sono sostanzialmente simili, con un aumento di memoria RAM a 8 GB e dello spazio su disco a 60 GB. Il sistema operativo utilizzato è Ubuntu Server 22.04.4 LTS, compatibile anche con la versione successiva

22.04.6 LTS. Inoltre è richiesta l'installazione di MicroK8 v1.24.17 con le componenti necessarie, Docker e la versione 3.9.18 di Python.

I vari esperimenti si sono svolti seguendo il seguente schema: attraverso il Service Level è stato introdotto un servizio nella rete sotto forma di intento per stabilire la connessione e il percorso. Successivamente, tramite il Management Level, è stata inserita una politica basata sugli eventi che consente di associare un Service Level Agreement (SLA) a un servizio specifico. Questo SLA include condizioni che devono essere monitorate e rispettate durante l'esecuzione del servizio.

Per iniziare il lavoro si è partiti da una demo già preesistente, apportando in seguito le modifiche necessarie.

## **4.1 Strumenti per la sperimentazione**

Prima di passare alla sperimentazione in seguito verranno descritti due strumenti che sono stati fondamentali per questa fase. L'uso di Mininet è stato necessario per la mancanza di una rete reale e, i dispositivi emulati sono stati degli switch P4. Questi hanno permesso, attraverso la loro programmazione, di portare a termine i vari esperimenti sui servizi e sulle politiche.

### **4.1.1 Mininet**

Mininet [68] è un sistema open source di orchestrazione per l'emulazione di reti su un unico ambiente Linux che permette di emulare un'intera rete su un singolo computer come rappresentato in Figura 4.1. E' ampiamente utilizzato in ambiti di ricerca e sviluppo per creare reti virtuali in modo realistico e testare nuove applicazioni o protocolli in un ambiente controllato prima di implementarli su reti reali.

Mininet è in grado di gestire un insieme di terminali di rete (host) utilizzando la virtualizzazione leggera a differenza di altri emulatori che utilizzano macchine virtuali per ogni dispositivo. Questo è reso possibile da tecnologie implementate nel kernel Linux, come i network namespaces che permettono di creare istanze separate di interfacce di rete, tabelle di routing e tabelle ARP, che operano in modo indipendente [69]. Questo approccio



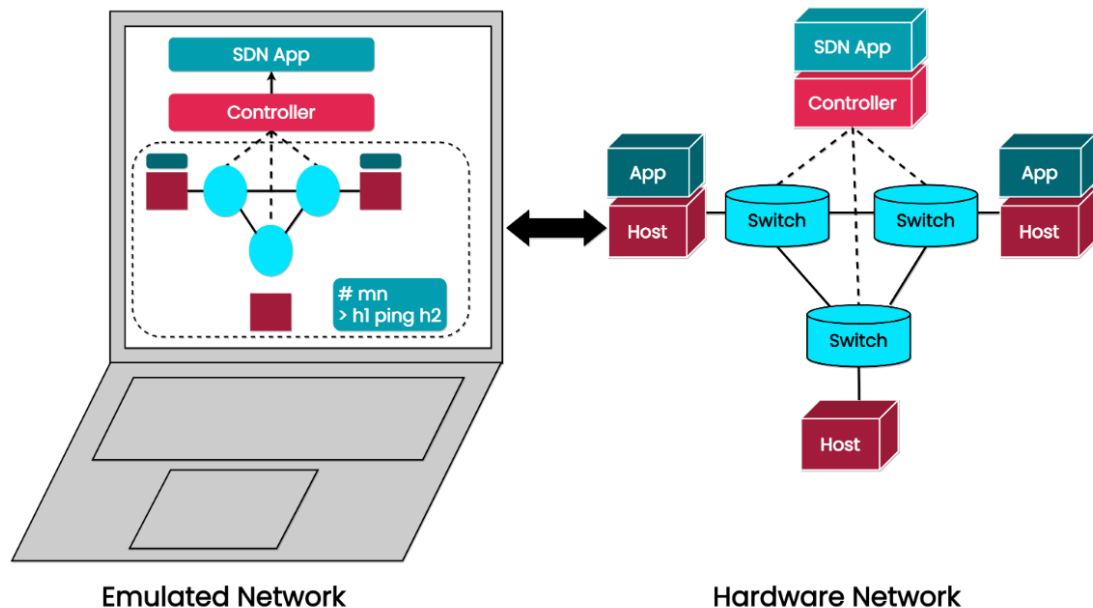


Figura 4.1: Rete mininet

consente di avviare numerosi host e switch (fino a 4096) su un singolo kernel del sistema operativo, simulando una rete completa su un'unica macchina [70].

Mininet offre delle API e un interprete Python che consentono di definire e gestire facilmente delle topologie di rete. È inoltre possibile utilizzare un'interfaccia a riga di comando (CLI) per la stessa funzione. In entrambi i casi, si possono configurare topologie predefinite o personalizzate, aggiungendo e rimuovendo switch, router, host, controller e link, tutti eseguiti su un unico computer. Consente anche di configurare regole per l'inoltro dei pacchetti per testare diverse funzionalità, come NAT (Network Address Translation) o ECMP (Equal-Cost Multi-Path), facilitando la condivisione e la replica degli scenari di test in ambienti con caratteristiche differenti.

Mininet mette a disposizione tre livelli differenti di API [71]:

- **Low-level:** consiste nelle classi dei nodi e dei link istanziati individualmente e usati per creare una rete.
- **Mid-level:** aggiunge un container per nodi e link, l'oggetto Mininet, e fornisce metodi per la configurazione di rete.

- **High-level:** aggiunge l'astrazione della topologia di rete, la classe Topo. Offre la possibilità di creare modelli di topologia riusabili passandoli al comando mn da linea di comando.

Si possono configurare i link come up o down e inserire metriche specifiche come quelle di banda, ritardo, perdita o massima lunghezza della coda di ricezione per rendere la rete più realistica e adatta a esperimenti di test.

Tuttavia la condivisione delle risorse del sistema può creare problemi. Inanzitutto queste dovranno essere bilanciate tra tutti gli host della rete. Inoltre, se un programma ha bisogno di file di configurazione specifici per ogni host è necessario crearne uno separato per ogni host e specificare quale file utilizzare quando si avvia il programma.

Mininet è stato progettato per essere facilmente integrabile con altri software e sistemi di rete. Anche se è fornito un controller di default, consente di connettere un controller SDN remoto agli switch, indipendentemente dal PC su cui è installato, in modo da fornire un ambiente adatto allo sviluppo.

## **Alcuni comandi fondamentali**

### **Linea di comando**

Inanzitutto è fondamentale creare una topologia di rete con il seguente comando[72]:

```
$ sudo mn
```

Di default viene inizializzata la topologia minimale (–topo=minimal) che consiste in uno switch connesso a due host e un controller OpenFlow. All'interno di Mininet si possono trovare altre topologie disponibili e visualizzabili con il comando

```
$ sudo mn -h
```

che si possono specificare tramite l'opzione – topo.

Per avviare la topologia esistono diverse opzioni da poter applicare. Ad esempio, l'opzione – controller seguito dall'indirizzo IP specifica il controller al quale gli switch dovranno collegarsi al posto del predefinito offerto da Mininet.

Una volta creata la topologia per avere informazioni su di essa esistono diversi comandi:

- *nodes*: per visualizzare i nodi presenti.

- *net*: per visualizzare i nodi e i link presenti.
- *dump*: per visualizzare tutte le informazioni di dump dei nodi.
- *h1 ifconfig*: per visualizzare le interfacce del nodo h1.

Alcuni comandi per interagire con la rete e fare dei test minimali sono:

- *h1 ping -c 1 h2* : verifica il corretto funzionamento del percorso tra h1 e h2.
- *pingall*: esegue il ping tra tutti gli host connessi alla rete.
- *iperf*: esegue un test di banda tra 2 degli host della rete.
- *xterm h1*: permette di avviare il terminale relativo al nodo h1.
- *exit*: esce dalla rete.

Per manipolare le metriche relative ai link invece vengono messi a disposizione i seguenti comandi:

- *link s1 h1 down*: disabilita un link, in questo caso quello tra lo switch s1 e l'host h1.
- *link s1 h1 up*: attiva un link, in questo caso quello tra lo switch s1 e l'host h1.
- *s2 tc qdisc add dev s2-eth2 root netem loss 50%* : aggiunge una packet loss del 50% sulla porta eth2 dello switch s2.
- *s2 tc qdisc add dev s2-eth2 root netem delay 200ms*: aggiunge un ritardo di 200ms sulla porta eth2 dello switch s2.
- *s2 tc qdisc del dev s2-eth2 root netem loss 50%* : elimina una packet loss del 50% sulla porta eth2 dello switch s2.
- *s2 tc qdisc del dev s2-eth2 root netem delay 200ms*: elimina un ritardo di 200ms sulla porta eth2 dello switch s2.

## API Python

Le API Python di Mininet permettono di creare e gestire topologie di rete in modo più flessibile e programmabile. Di seguito esponiamo alcune classi e comandi della Mid-level API:

- *Mininet*: classe per creare e gestire la rete. Il costruttore prende in input diversi parametri la topologia, gli host, gli switch, i controller, i link e ritorna un oggetto di rete.
- *addSwitch()*: aggiunge uno switch alla topologia.
- *addHost()*: aggiunge un host alla topologia.
- *addLink()*: aggiunge un link alla topologia. Si possono specificare parametri come la banda espressa in Mbit (bw=10 ), il ritardo (delay='5ms'), massima dimensione della coda espressa in numero di pacchetti (max\_queue\_size=1000), la loss espressa in percentuale (loss=10)
- *start*: avvia la rete
- *stop*: esce dalla rete
- *pingall*: esegue il ping tra tutti gli host connessi alla rete
- *h1.cmd('comando da eseguire')*: esegue un comando su h1 da CLI e prende l'output

Con le API in Python si può anche estendere il comando *mn* usando l'opzione *-custom* per invocare la topologia ricreata nello script.

```
sudo mn -your_script.py -topo your_topo
```

### 4.1.2 P4

Programming Protocol-independent Packet Processor (P4 [73]), è un linguaggio di programmazione flessibile che permette di descrivere il comportamento degli elementi di rete, consentendo di personalizzare come i dispositivi elaborano i pacchetti.

I principali obiettivi sono:

- **Indipendenza dal protocollo:** P4 non è vincolato a nessun protocollo specifico consentendo anche di definirne di nuovi o modificare quelli esistenti
- **Indipendenza dal target:** Il codice può essere compilato per funzionare su diversi dispositivi, sia hardware che software, rendendolo versatile
- **Riprogrammabilità:** Il comportamento del piano dati può essere aggiornato dinamicamente consentendo di rispondere rapidamente ai cambiamenti delle esigenze di rete.

P4 è stato introdotto per superare le limitazioni di OpenFlow al fine di fornire una soluzione più flessibile.

OpenFlow, pur separando il piano di controllo e il piano dati, si basa su regole di elaborazione dei pacchetti attraverso tabelle che mappano i campi degli header (indirizzi IP, MAC, porte...) in un insieme fisso di funzionalità.

Negli anni le specifiche dei pacchetti sono diventate sempre più complesse, nonchè dipendenti dalle singole aziende che hanno iniziato a sviluppare l'hardware indipendentemente, rendendo necessari continui aggiornamenti per supportare le varie esigenze[74]. D'altra parte, gli switch non aggiornati, o prodotti da aziende diverse, non riescono a supportare tutte le nuove caratteristiche a causa delle limitazioni hardware.

Inoltre, OpenFlow non fornisce delle interfacce operative o amministrative standard, quindi rende complicato aggiungere supporto per nuovi protocolli. Tutte queste problematiche hanno portato all'introduzione di dispositivi programmabili che utilizzano P4.

P4 consente di definire intestazioni e tabelle personalizzate, e programmare esplicitamente il flusso di controllo dello switch, permettendo di adattarsi rapidamente ai cambiamenti e alle innovazioni.

Nella Figura 4.2 è illustrato il Workflow del modello di P4.

Un programma P4 (P4 Program) definisce il comportamento del piano dati desiderato ed è suddiviso in varie sezioni, ognuna delle quali descrive un aspetto specifico del trattamento dei pacchetti. Il processo inizia con la dichiarazione degli header del pacchetto da analizzare, successivamente si definisce il comportamento del parser, le tabelle, le azioni e il flusso di controllo.

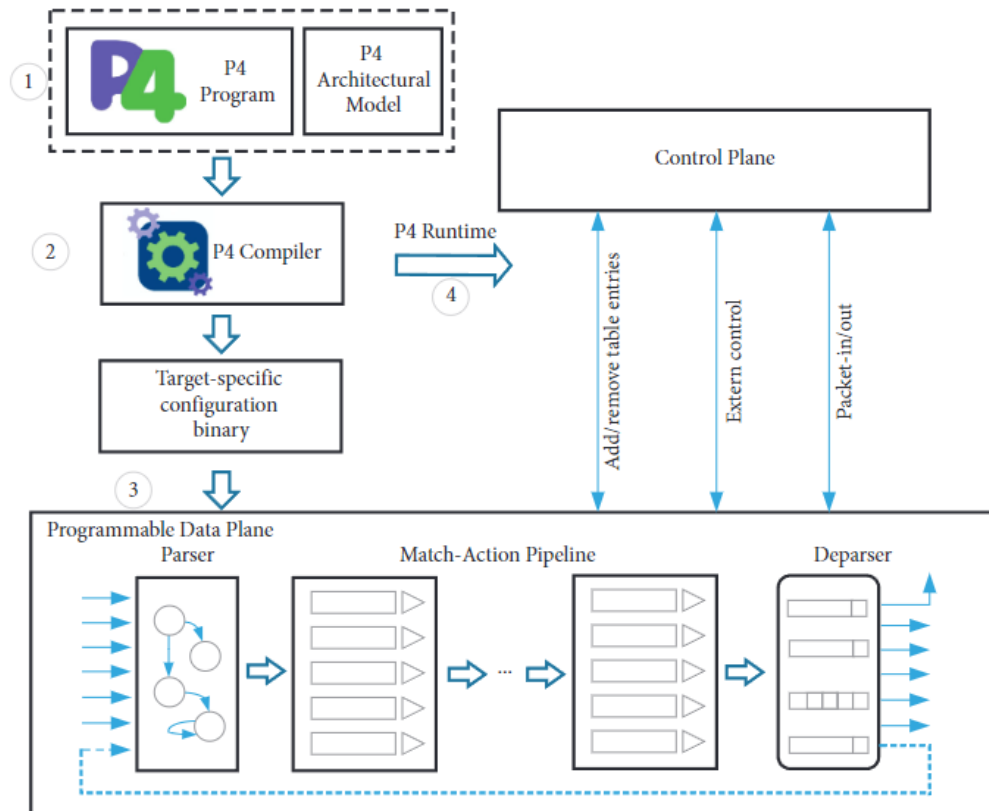


Figura 4.2: Workflow di P4 sul piano dati [9]

Il programma viene poi inviato al compilatore P4 (P4 Compiler) che genera due tipi di output. Il primo è un file eseguibile che descrive le varie operazioni da implementare all'interno del dispositivo target. I target P4 sono dispositivi programmabili ottenibili tramite hardware, come ASICs o FPGA, o software, che realizzano il comportamento desiderato mettendo in atto le specifiche descritte nel programma grazie al file eseguibile. Il parser all'interno dei dispositivi specifica come estrarre e interpretare i vari header dei pacchetti seguendo uno schema prestabilito.

La pipeline di elaborazione (Match-Action Pipeline) include tabelle e azioni che determinano come processare i pacchetti. La struttura della pipeline è distinta per ciascun dispositivo ed è descritta da un determinato modello di architettura. Il flusso di controllo invece coordina parser e pipeline per garantire il corretto funzionamento dell'intero processo. Infine, il deparser ricompone i pacchetti con le eventuali modifiche degli header e

successivamente li reintroduce nella rete.

Il secondo file generato dal compilatore è indipendente dal target e contiene le informazioni necessarie per far comunicare il piano di controllo e il piano dati tramite l'API P4Runtime.

P4Runtime permette al controller di connettersi ai dispositivi e interagire con la pipeline per poter inviare le configurazioni nella relativa tabella [9]. I dettagli hardware del piano dati sono nascosti al piano di controllo rendendolo indipendente dalle funzionalità e dai protocolli supportati. P4 rappresenta un passo significativo verso reti più flessibili e programmabili, consentendo agli sviluppatori di adattarsi rapidamente ai cambiamenti dei requisiti di rete. Si propone come una soluzione innovativa e versatile per superare le limitazioni degli attuali protocolli e dispositivi di rete fornendo un linguaggio dinamico e indipendente dall'hardware.

## 4.2 Descrizione Workflow

Nei paragrafi successivi verrà descritto il Workflow della sperimentazione illustrato in Figura 4.3, in seguito verranno forniti i dettagli più pratici relativi a un'analisi approfondita delle funzioni del controller utilizzate.

### **Servizio end-to-end**

Come già detto in precedenza il Device Level sfrutta una South-Bound Interface (SBI) per interagire con i device tramite l'API P4Runtime. Inizialmente, il codice P4 compilato viene copiato nel pod SBI per poter inserire le giuste configurazioni nelle tabelle dei dispositivi. Il passo successivo consiste nel registrare i dispositivi e i link al controller SDN, in particolare alla componente di Context, per permettere una corretta comunicazione tra di essi. A questo punto, siamo in grado di richiedere una connessione tra due end points alla componente di Service specificando solamente i dispositivi finali tramite un servizio. La creazione del servizio è realizzata grazie alle funzioni messe a disposizione dalla componente di Service all'interno del controller la cui implementazione si può trovare nel file [75].

Inizialmente, tramite la funzione *CreateService*, si crea un servizio di connettività vuo-

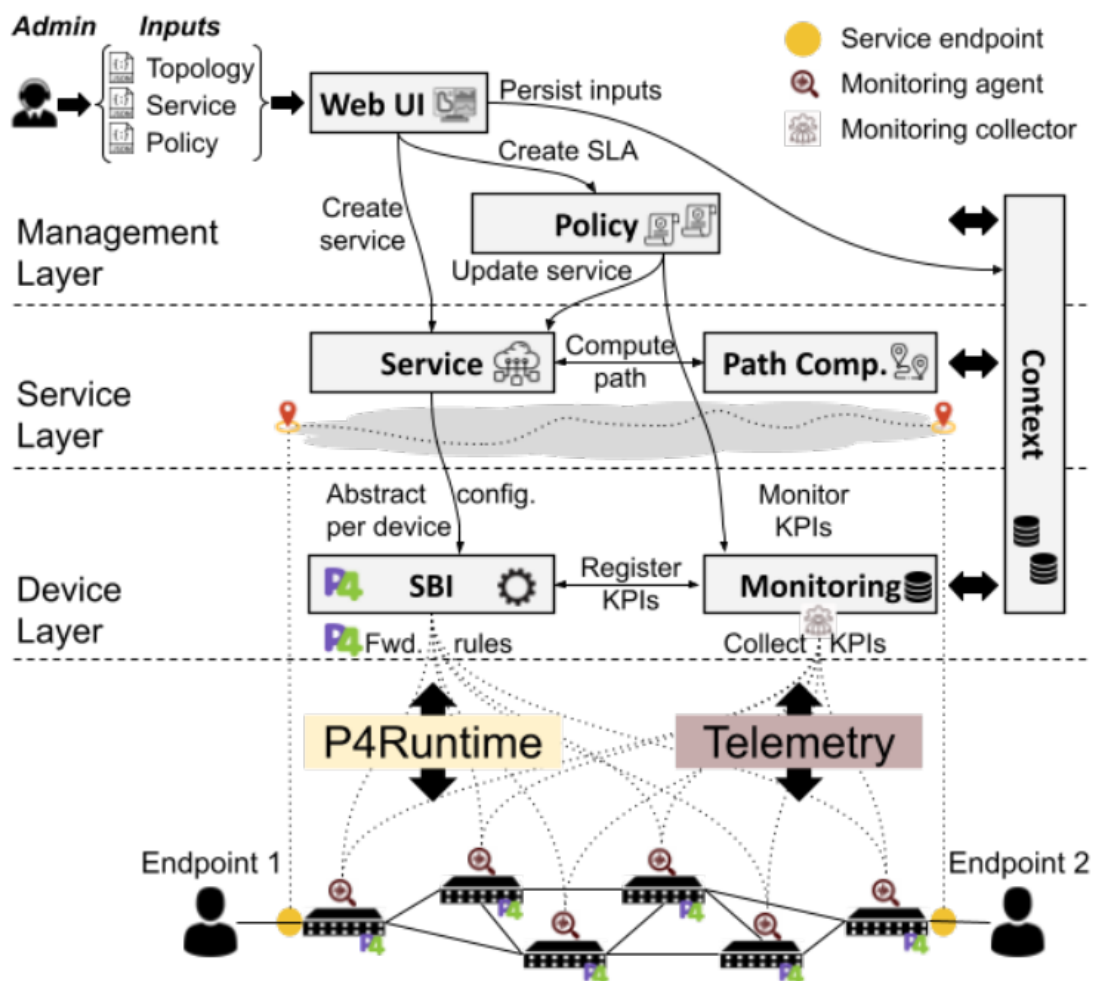


Figura 4.3: Interazione tra alcune componenti in TeraFlow

to nel quale viene specificato solo il tipo associato per poi memorizzare l'identificativo a cui è stato correlato nel Context database e ritornarlo. Nella Figura 4.3 il servizio è stato richiesto dalla componente Web UI, mentre nella nostra sperimentazione si è usato uno script interno al controller. Successivamente, passando il servizio con i relativi parametri, viene aggiornato popolando i campi richiesti come endpoints, vincoli e configurazioni di servizio. Di questo si occupa la funzione *UpdateService* [6]. La componente di Service a questo punto si rivolge prima alla componente di Context per recuperare la versione più aggiornata del servizio e settare lo stato a Planned (pianificato), poi alla PathComp per calcolare un percorso.



Per eseguire questa operazione la PathComp utilizza delle informazioni della rete che risiedono nel Context database. La PathComp è in grado di soddisfare anche richieste di servizio che attraversano più livelli, in questo caso, la risposta includerà uno o più sottoservizi con le relative sottoconnessioni che li supportano.

Una volta ricevute le connessioni ed eventuali sottoservizi la componente Service istanzia un *Task Scheduler*. Quest'ultimo è responsabile dell'esecuzione delle attività di installazione e smantellamento dei servizi e collegamenti nell'ordine appropriato. Come ultima operazione viene eseguito il metodo *Execute* del *Task Scheduler* per realizzare tutte le operazioni di configurazione richieste per i dispositivi lungo il percorso tramite l'SBI; inoltre viene modificato lo stato del servizio in Active (attivo). Al termine del processo, il database della componente Context viene aggiornato con le nuove informazioni e l'identificatore del servizio viene nuovamente restituito all'entità chiamante.

Per mantenere questo processo agnostico rispetto ai dettagli della tecnologia, la componente di Service sfrutta una definizione minima permettendo agli utenti di specificare solo quali dispositivi vogliono connettere. La componente traduce automaticamente questa definizione del servizio in modelli di configurazioni astratte dei dispositivi. Queste vengono a loro volta tradotte in regole P4 dal driver del dispositivo P4 della SBI.

### **Vincoli e configurazioni di servizio**

È possibile richiedere azioni supplementari, come l'aggiunta di vincoli o configurazioni di servizio specifiche. Queste vengono specificate inizialmente alla creazione di un servizio e devono essere rispettate finché quest'ultimo non verrà eliminato. Ciò semplifica la gestione dei servizi, in quanto la dichiarazione di queste informazioni aggiuntive può sostituire l'associazione di una politica.

Nella demo presa in considerazione i vincoli non erano specificati ma sono stati aggiunti per quanto riguarda la latenza e la capacità del percorso, come si può vedere nella Figura 4.13. Questa aggiunta non ha prodotto cambiamenti nella manutenzione del servizio poiché le funzioni relative all'effettivo funzionamento di queste funzionalità non sono ancora state implementate nel controller ma sono solo pianificate per release future. Anche se nella documentazione ufficiale non sono menzionati i vari tipi di vincoli supportati si possono ritrovare nel file [76].

## Politica

Una parte fondamentale nei sistemi moderni è la gestione a run-time del servizio stabilito[77]. Per garantire questa richiesta è necessario associare una politica al servizio per richiedere un Service Level Agreement (SLA).

Inizialmente, alla creazione del servizio, si associano le differenti Kpi tramite i KpiDescriptor. In ogni KpiDescriptor si devono specificare i valori numerici da rispettare insieme al tipo di Kpi (KpiSampleType), che può essere predefinito (illustrati nel File [78]), oppure, utilizzando il tipo UNKNOWN, si può personalizzare tramite una descrizione. Successivamente si richiama la funzione della componente di Monitoring *SetKpi* per ogni regola, passando il KpiDescriptor come parametro, così da associare il monitoraggio delle metriche richieste a una kpi nel Monitoring database e restituire il relativo identificatore. Se a uno stesso servizio si associano più KPI ognuna deve avere associato un KpiSampleType diverso altrimenti, anche con una descrizione differente, verrà associato lo stesso identificativo per monitorare metriche diverse, quindi solo una condizione per servizio può essere personalizzata. Infine al servizio viene associata una politica specificando le diverse regole collegate tra loro da operatori booleani come AND/OR tramite file JSON. Per definire una politica va specificato l'id del contesto a cui si vuole associare e l'id del relativo servizio, successivamente si specificano le regole. Ogni regola è composta dall'identificatore della Kpi, l'operatore numerico (maggiore, minore o uguale [79]) insieme al valore limite per definire l'intervallo di valori non ammessi e infine l'azione da eseguire (le possibili azioni sono riportate nel file [80]). Quando i requisiti non vengono soddisfatti, la componente di Monitoring solleva un allarme che fa scattare l'azione prestabilita.

## 4.3 Sperimentazione

In questa sezione verranno descritti gli esperimenti svolti esponendo i codici, le topologie e i comandi usati in modo tale da permetterne la riproduzione. In alcuni casi è stata necessaria la modifica dei codici originali; tutti i file sono riportati in Appendice.

Per verificare il comportamento del controller, non avendo a disposizione una rete reale, sono state utilizzate delle topologie di rete riprodotte tramite Mininet basate su bmv2[81],

la seconda versione dello switch software di riferimento P4.

### 4.3.1 Demo

Inizialmente si è riprodotta la demo dell'Hackfest 3. I comandi e la spiegazione completa dell'esperimento si possono ritrovare nella pagina del sito [66].

Dopo aver verificato che le componenti del controller siano in stato di running (*Kubectl get pods -n=tfs*), si istanzia la topologia [82], illustrata in Figura 4.5, sul container di Mininet collegato al controller. Dalla cartella *ngsdn-tutorial* si invoca *make start* e *make mn-cli* per l'avvio.

Nel file *Objects.py* sono descritti gli switch che fanno parte della topologia con i relativi dispositivi, collegamenti e servizi che verranno usati dai vari script per reperire le informazioni necessarie.

Il primo comando da eseguire sul terminale relativo al controller (*./src/tests/hackfest3/setup.sh*) configura il pod Kubernetes dell'SBI inserendo le configurazioni di P4 necessarie al server per comunicare con gli switch.

Successivamente tramite il comando *./src/tests/hackfest3/run\_test\_01\_bootstrap.sh* viene registrata la topologia collegata a Mininet al controller inserendo i dispositivi e i collegamenti nel Context database, così da poter proseguire con l'installazione del servizio.

Cercando nel browser <http://localhost:8080/webui> si può accedere all'interfaccia grafica e, selezionando il contesto *Context:(admin):Topology(admin)*, si può visualizzare la topologia di rete e le configurazioni dei device.

Prima di continuare con la creazione del servizio, in un altro terminale, dalla cartella *probe-tfs*, si copia ricorsivamente la cartella target nella directory corrente (*cp -r ~/controller/src/tests/p4/probe/probe-tfs/target .* ) necessaria per eseguire i comandi successivi, ci si collega al container di Mininet (*./connect-to-mininet.sh*) e si attiva lo script *tfsagent* (*./tfsagent.sh*) che permette di ascoltare gli eventi dalla componente di Context e, quando un servizio viene registrato, crea la *KpiDescriptor* relativa alla latenza e la registra nel Monitoring database. In questo script il *KpiSampleType* specificato è UNKNOWN e il relativo commento è "*Latency value for service { }*" Successivamente si mette in attesa dei dati dal *tfsping* per ricevere le metriche relative alla latenza del collegamento e crea delle

kpi per mandarle alla componente di Monitoring.

A questo punto si può creare il servizio tra i due endpoints (`./src/tests/hackfest3/run_test_02_create_service.sh`) e visualizzarlo sull’interfaccia web, come si può vedere nelle Figure 4.4 e 4.5. Gli endpoints relativi a questa demo sono “SW1-port3” e “SW4-port3”, gli switch

| UUID                                 | Name             | Type | End points   | Status |
|--------------------------------------|------------------|------|--|--------|
| c7d6c3f4-395e-5973-98d3-8d90f8fc9141 | svc:SW1/3==SW4/3 | L2NM | <ul style="list-style-type: none"> <li>3 / Device: <a href="#">SW1</a></li> <li>3 / Device: <a href="#">SW4</a></li> </ul> | ACTIVE |

Figura 4.4: Servizio

**Service svc:SW1/3==SW4/3 (c7d6c3f4-395e-5973-98d3-8d90f8fc9141)**

[Back to service list](#) [Delete service](#)

Context: 43813baf-195e-5da6-af20-b3d0922e71a7  
 UUID: c7d6c3f4-395e-5973-98d3-8d90f8fc9141  
 Name: svc:SW1/3==SW4/3  
 Type: L2NM  
 Status: ACTIVE

| Endpoint UUID                        | Name | Device              | Endpoint Type |
|--------------------------------------|------|---------------------|---------------|
| 70833ecf-b681-5023-a587-485d44ee2ad5 | 3    | <a href="#">SW1</a> |               |
| c1110e8c-4adc-5e09-b77e-6a3455c7977c | 3    | <a href="#">SW4</a> |               |

**Constraints:**

| Kind | Key/Type | Value |
|------|----------|-------|
|      |          |       |

**Configurations:**

| Key | Value |
|-----|-------|
|     |       |

**Connection Id**      **Sub-Service**      **Path**

|                                      |                        |  |
|--------------------------------------|------------------------|--|
| 3b5f3d55-1dce-403a-ae04-19eca8b24ccc | <a href="#">SW1</a> /3 | <a href="#">SW1</a> /1 <a href="#">SW2</a> /1 <a href="#">SW2</a> /2 <a href="#">SW4</a> /1 <a href="#">SW4</a> /3 |
|--------------------------------------|------------------------|--|

Figura 4.5: Servizio 4 sw iniziale

della topologia collegati rispettivamente al client e al server istanziati su Mininet. A questo punto si modifica il file `manifests/policyservice.yaml`, come rappresentato in Figura 4.6, aprendolo dal terminale con il comando `kubectl edit svc policyservice -n=tfs`. Adesso, da un ulteriore terminale, dalla cartella `grpc`, si può installare la regola di politica tramite

```
targetPort: 6060
nodePort: 30060
selector:
  app.kubernetes.io/name: policyservice
sessionAffinity: None
type: NodePort
status:
```

Figura 4.6: File policyservice modificato

un file JSON (*policyAddService.json*) eseguendo *./addPolicy.sh*. Dalla Web UI si può visualizzare la politica rappresentata nella Figura 4.7. Infine, per verificare che la politica

## Policy Rules

1 policy rules found in context *admin*

| UUID  | Kind    | Priority | Condition   | Operator | Action   | Service   | Devices | State     | Message  |
|---|---------|----------|---|----------|--|---|---------|-----------|--|
| uuid:<br>"c4b5e66e-<br>fa99-5075-<br>9b6e-<br>760476791fc1" | service | 0        | [kpiId { kpi_id { uuid: "1" } } numericalOperator:<br>POLICYRULE_CONDITION_NUMERICAL_GREATER_THAN<br>kpiValue { floatVal: 10000.0 } ] | 2        | [action:<br>POLICY_RULE_ACTION_RECALCULATE_PATH<br>action_config { } ] | context_id {<br>context_uuid {<br>uuid:<br>"43813baf-<br>195e-5da6-<br>af20-<br>b3d0922e71a7"<br>} } service_uuid<br>{ uuid:<br>"c7d6c3f4-<br>395e-5973-<br>98d3-<br>8d90f8fc9141"<br>} | []      | VALIDATED | Successfully<br>transitioned<br>to<br>VALIDATED<br>state |

Figura 4.7: Politica con regola di latenza

inserita sia efficace, tramite il primo terminale aperto su Mininet si aggiunge un ritardo su un'interfaccia di uno switch interno al percorso prestabilito tramite il comando *switch2 tc qdisc add dev switch2-eth2 root netem delay 2000ms*, in questo caso è lo switch2 sull'interfaccia eth2. A questo punto, si esegue *client ./tfsping* per mandare le metriche al *tfsgent* e attendere un cambiamento del percorso. In questa fase, finchè il percorso non è cambiato e la latenza continua a essere superiore a quella richiesta, lo stato della politica passa a ACTIVE a PROVISIONED o UPDATED, mentre il servizio a ENFORCED. Nella Figura 4.8 si può vedere il nuovo percorso.

Si è fatta anche un'ulteriore prova, invece di aumentare la latenza si è direttamente disattivato un link tra due switch, in questo caso switch2 e switch4, tramite *link switch2*

*switch4* down e si è potuto constatare che anche in questo modo viene attivata l'azione della politica.

**Service svc:SW1/3==SW4/3 (c7d6c3f4-395e-5973-98d3-8d90f8fc9141)**

Context: 43813baf-195e-5da6-af20-b3d0922e71a7  
 UUID: c7d6c3f4-395e-5973-98d3-8d90f8fc9141  
 Name: svc:SW1/3==SW4/3  
 Type: L2NM  
 Status: ACTIVE

| Endpoint UUID                        | Name | Device | Endpoint Type |
|--------------------------------------|------|--------|---------------|
| 70833ecf-b681-5023-a587-485d44ee2ad5 | 3    | SW1    |               |
| c1110e8c-4adc-5e09-b77e-6a3455c7977c | 3    | SW4    |               |

**Constraints:**

| Kind | Key/Type | Value |
|------|----------|-------|
|      |          |       |

**Configurations:**

| Key | Value |
|-----|-------|
|     |       |

**Connection Id**      **Sub-Service**      **Path**

|                                      |       |                                       |
|--------------------------------------|-------|---------------------------------------|
| 71ed9e35-79d2-4d7a-b879-2c2c6875656a | SW1/3 | SW1/2   SW3/1   SW3/2   SW4/2   SW4/3 |
|--------------------------------------|-------|---------------------------------------|

Figura 4.8: Servizio 4 sw cambio percorso

## 4.3.2 Esperimento 2

In questo esperimento la topologia di base da cui ha avuto inizio è stata quella descritta nel file *controller/src/tests/p4/mininet/8switch3path.py*, ma successivamente sono stati aggiunti dei link per creare 5 possibili percorsi al posto di 3; la topologia finale è illustrata nella Figura ???. Prima di inizializzare la topologia è stato necessario modificare il file *ngsdn-tutorial/mininet/docker-compose.yaml* per abilitare ulteriori porte Mininet di collegamento al controller (50005,50006,50007,50008). Per quanto riguarda il terminale Mininet l'unico comando che cambia è *make start-8* per inizializzare questa nuova topologia.

Gli script necessari si possono trovare nella cartella P4 del controller [83] dove è stata necessaria l'aggiunta dei nuovi collegamenti al file *Objects.py* per una corretta sincronizzazione con il container Mininet.

Per quanto riguarda la parte iniziale i comandi sono gli stessi, ovviamente cambiando la cartella dei file, quindi *./src/tests/p4/setup.sh* e *./src/tests/p4/run\_test\_01\_bootstrap.sh*.

In seguito, per il probe, quindi l'agent e il ping, si è continuata la demo dell'Hackfest 3 con

la parte dell'Interactive Hacking Session #1. In questa parte il probe si trova nella cartella *controller/src/tests/hackfest3/new-probe/solution* e sono due script scritti in Python con il medesimo funzionamento dei precedenti.

I file sono stati poi modificati successivamente per aggiungere la Kpi relativa alla packet loss.

In un terminale relativo alla cartella si eseguono i seguenti comandi: `source ~/tfs-ctrl/tfs_runtime_env_vars.sh` per inserire le variabili di TeraFlow necessarie, se l'ambiente Python è disattivato `pyenv activate 3.9.18/envs/tfs` e infine `python agent.py`. Quando si eseguirà il comando relativo alla creazione del servizio (`./src/tests/p4/run_test_02_create_service.sh`) sul terminale in cui è in esecuzione l'agent si vedrà l'output in Figura 4.10.

Il servizio richiesto ha come endpoints "SW1-port4" e "SW8-port4", come si può vedere in Figura 4.9.

Service svc:SW1/4==SW8/4 (d5261206-1047-51c0-8ef2-89b4c601afe7)

Back to service list

Delete service

Context: 43813baf-195e-5da6-af20-b3d0922e71a7  
UUID: d5261206-1047-51c0-8ef2-89b4c601afe7  
Name: svc:SW1/4==SW8/4  
Type: L2NM  
Status: ACTIVE

| Endpoint UUID                        | Name | Device | Endpoint Type |
|--------------------------------------|------|--------|---------------|
| 82b62384-23c7-5794-9d41-63b7ad775258 | 4    | SW1    |               |
| 8dd86fc0-c0c7-5540-a384-a4d70141b43c | 4    | SW8    |               |

Constraints:

| Kind | Key/Type | Value |
|------|----------|-------|
|------|----------|-------|

Configurations:

| Key | Value |
|-----|-------|
|-----|-------|

| Connection Id                        | Sub-Service | Path  |
|--------------------------------------|-------------|---|
| 84aaeeeb-cb85-4590-bcf7-84cacbad9006 | SW1 / 4     | SW1 / 3 SW6 / 1 SW6 / 2 SW7 / 1 SW7 / 2 SW8 / 3 SW8 / 4 |

Figura 4.9: Servizio 8 sw iniziale

Per creare la politica si riutilizzano gli script precedenti assicurandosi di cambiare nel file *policyAddService.json* gli id relativi al contesto e al servizio e di aggiungere alle regole quella relativa alla packet loss. La politica risultante è illustrata in Figura 4.11. Sul terminale Mininet, oltre alle prove fatte aggiungendo dei ritardi e disattivando dei link si è provato a simulare una packet loss tramite il comando `switch4 tc qdisc add dev switch6-eth2 root netem loss 7%`. Per verificare il cambio del percorso si è dovuto modificare anche il file *ping2.py* per riuscire a mandare tramite la socket entrambe le metriche, calcolate

```

stream: New CREATE event:
context_id {
  context_uuid {
    uuid: "43813baf-195e-5da6-af20-b3d0922e71a7"
  }
}
service_uuid {
  uuid: "d5261206-1047-51c0-8ef2-89b4c601afe7"
}

loss: kpi_id {
  uuid: "1"
}

latency: kpi_id {
  uuid: "2"
}

```

Figura 4.10: Creazione kpi

| TeraFlow Home Device Link Service Slice Policy Rules Grafana Debug Load Generator BGPLS About Selected Context(admin)/Topology(admin) |         |          |  |          |  |  |         |        |  |
|---|---------|----------|--|----------|--|--|---------|--------|--|
| Policy Rules  |         |          |  |          |  |  |         |        |  |
| 1 policy rules found in context admin   |         |          |  |          |  |  |         |        |  |
| UUID  | Kind    | Priority | Condition  | Operator | Action   | Service  | Devices | State  | Message  |
| uuid: "c4b5e66e-fa99-5075-9b6e-760476791fc1"  | service | 0        | [kpid { kpi_id { uuid: "1" } } numericalOperator: POLICYRULE_CONDITION_NUMERICAL_GREATER_THAN kpiValue { floatVal: 5.0 } , kpid { kpi_id { uuid: "2" } } numericalOperator: POLICYRULE_CONDITION_NUMERICAL_GREATER_THAN kpiValue { floatVal: 100.0 } ] | 2        | [action: POLICY_RULE_ACTION_RECALCULATE_PATH action_config { } ] | context_id { context_uuid { uuid: "43813baf-195e-5da6-af20-b3d0922e71a7" } } service_uuid { uuid: "d5261206-1047-51c0-8ef2-89b4c601afe7" } | []      | ACTIVE | Successfully transitioned from PROVISIONED to ACTIVE state |

Figura 4.11: Politica latenza e pkt loss

grazie all'esecuzione del comando ping di Mininet. Per un problema di comunicazione si è modificato il percorso della socket, infatti inizialmente era `/home/teraflow/ngsdn-tutorial/tmp/sock` ed è stato cambiato in `/tmp/tfsping`. A questo punto si è attivato il ping. I comandi eseguiti partendo dalla cartella solution sono i seguenti: `./copy.sh; cd /ngsdn-tutorial; make mn-cli; client python ping2.py 10.0.0.2`. Anche in questo caso si è riscontrato un cambiamento nel percorso come mostrato in Figura 4.12

### 4.3.3 Esperimento 3

L'ultima topologia utilizzata è stata Abilene [84]; una rete di trasporto creata da Internet2. La topologia Mininet [85] con i parametri modificati per la bw



## Service svc:SW1/4==SW8/4 (d5261206-1047-51c0-8ef2-89b4c601afe7)

[Back to service list](#)[Delete service](#)**Context:** 43813baf-195e-5da6-af20-b3d0922e71a7**UUID:** d5261206-1047-51c0-8ef2-89b4c601afe7**Name:** svc:SW1/4==SW8/4**Type:** L2NM**Status:** ACTIVE

| Endpoint UUID                        | Name | Device              | Endpoint Type |
|--------------------------------------|------|---------------------|---------------|
| 82b62384-23c7-5794-9d41-63b7ad775258 | 4    | <a href="#">SW1</a> |               |
| 8dd86fc0-c0c7-5540-a384-a4d70141b43c | 4    | <a href="#">SW8</a> |               |

**Constraints:**

| Kind            | Key/Type | Value     |
|-----------------|----------|-----------|
| SLA Capacity    | -        | 10.0 Gbps |
| SLA E2E Latency | -        | 15.2 ms   |

**Configurations:**

| Key | Value |
|-----|-------|
|-----|-------|

| Connection Id                        | Sub-Service | Path  |
|--------------------------------------|-------------|---|
| 4a3db8a1-adf4-4e9b-a98d-b2dcd32ba627 |             | <a href="#">SW1</a> / 4 <a href="#">SW1</a> / 2 <a href="#">SW4</a> / 1 <a href="#">SW4</a> / 2 <a href="#">SW5</a> / 1 <a href="#">SW5</a> / 2 <a href="#">SW8</a> / 2 <a href="#">SW8</a> / 4 |

Figura 4.12: Servizio 8 sw cambio percorso

Cambio topologia, nuovo script mininet (preso da internet con cambio bw)

aggiunte porte,

aggiunta metrica di capacità alla politica

descrizione comando mininet per modificare capacità

aggiunto iperf al probe

Service svc:SW1/3==SW8/4 (be1fbc16-fad4-5832-9a32-754a7d134b81)

[Back to service list](#)[Delete service](#)

**Context:** 43813baf-195e-5da6-af20-b3d0922e71a7

**UUID:** be1fbc16-fad4-5832-9a32-754a7d134b81

**Name:** svc:SW1/3==SW8/4

**Type:** L2NM

**Status:** ACTIVE

| Endpoint UUID                        | Name | Device              | Endpoint Type |
|--------------------------------------|------|---------------------|---------------|
| 70833ecf-b681-5023-a587-485d44ee2ad5 | 3    | <a href="#">SW1</a> |               |
| 8dd86fc0-c0c7-5540-a384-a4d70141b43c | 4    | <a href="#">SW8</a> |               |

**Constraints:**

| Kind            | Key/Type | Value     |
|-----------------|----------|-----------|
| SLA Capacity    | -        | 10.0 Gbps |
| SLA E2E Latency | -        | 15.2 ms   |

**Configurations:**

| Key | Value |
|-----|-------|
|-----|-------|

| Connection Id                        | Sub-Service | Path  |
|--------------------------------------|-------------|---|
| c92e1ae7-8cae-447d-8685-7a9292eec701 |             | <a href="#">SW1</a> / <a href="#">SW1</a> / <a href="#">SW3</a> / <a href="#">SW3</a> / <a href="#">SW10</a> / <a href="#">SW10</a> / <a href="#">SW9</a> / <a href="#">SW9</a> / <a href="#">SW8</a> / <a href="#">SW8</a> |
|                                      |             | 3 2 1 2 1 2 3 2 2 4   |

Figura 4.13: abilene iniziale

[DW](#) [Home](#) [Device](#) [Link](#) [Service](#) [Slice](#) [Policy Rules](#) [Grafana](#) [Debug](#) [Load Generator](#) [BGPLS](#) [About](#)

Selected Context(admin)/Topology(admin)

### Policy Rules

1 policy rules found in context *admin*

| UUID   | Kind    | Priority | Condition  | Operator | Action   | Service  | Devices | State       | Message   |
|--|---------|----------|--|----------|--|--|---------|-------------|---|
| uuid: "c4b5e66e-fa99-5075-9b6e-760476791fc1" | service | 0        | [kpild { kpi_id { uuid: "1" } } numericalOperator: POLICYRULE_CONDITION_NUMERICAL_GREATER_THAN kpiValue { floatVal: 5.0 } , kpild { kpi_id { uuid: "2" } } numericalOperator: POLICYRULE_CONDITION_NUMERICAL_GREATER_THAN kpiValue { floatVal: 100.0 } , kpild { kpi_id { uuid: "3" } } numericalOperator: POLICYRULE_CONDITION_NUMERICAL_LESS_THAN kpiValue { floatVal: 0.002 } ] | 2        | [action: POLICY_RULE_ACTION_RECALCULATE_PATH action_config { } ] | context_id { context_uuid { uuid: "43813baf-195e-5da6-af20-b3d0922e71a7" } } service_uuid { uuid: "be1fbc16-fad4-5832-9a32-754a7d134b81" } | []      | PROVISIONED | Successfully transitioned from VALIDATED to PROVISIONED state |

Figura 4.14: Servizio 8 sw cambio percorso

Service svc:SW1/3==SW8/4 (be1fbc16-fad4-5832-9a32-754a7d134b81)

[Back to service list](#)[Delete service](#)

**Context:** 43813baf-195e-5da6-af20-b3d0922e71a7  
**UUID:** be1fbc16-fad4-5832-9a32-754a7d134b81  
**Name:** svc:SW1/3==SW8/4  
**Type:** L2NM  
**Status:** ACTIVE

| Endpoint UUID                        | Name | Device | Endpoint Type |
|--------------------------------------|------|--------|---------------|
| 70833ecf-b681-5023-a587-485d44ee2ad5 | 3    | SW1    |               |
| 8dd86fc0-c0c7-5540-a384-a4d70141b43c | 4    | SW8    |               |

**Constraints:**

| Kind            | Key/Type | Value     |
|-----------------|----------|-----------|
| SLA Capacity    | -        | 10.0 Gbps |
| SLA E2E Latency | -        | 15.2 ms   |

**Configurations:**

| Key                                  | Value  |
|--------------------------------------|--|
| Connection Id                        | Sub-ServicePath                                    |
| e385f934-ae9b-445a-b7c4-531d61952188 | SW1/ 3SW1/ 1SW2/ 1SW2/ 2SW11/ 1SW11/ 2SW8/ 3SW8/ 4 |

Figura 4.15: Servizio 8 sw cambio percorso

Service svc:SW1/3==SW8/4 (be1fbc16-fad4-5832-9a32-754a7d134b81)

[Back to service list](#)[Delete service](#)

**Context:** 43813baf-195e-5da6-af20-b3d0922e71a7  
**UUID:** be1fbc16-fad4-5832-9a32-754a7d134b81  
**Name:** svc:SW1/3==SW8/4  
**Type:** L2NM  
**Status:** ACTIVE

| Endpoint UUID                        | Name | Device | Endpoint Type |
|--------------------------------------|------|--------|---------------|
| 70833ecf-b681-5023-a587-485d44ee2ad5 | 3    | SW1    |               |
| 8dd86fc0-c0c7-5540-a384-a4d70141b43c | 4    | SW8    |               |

**Constraints:**

| Kind            | Key/Type | Value     |
|-----------------|----------|-----------|
| SLA Capacity    | -        | 10.0 Gbps |
| SLA E2E Latency | -        | 15.2 ms   |

**Configurations:**

| Key                                  | Value  |
|--------------------------------------|--|
| Connection Id                        | Sub-ServicePath  |
| 434dbd17-4700-4482-9b85-233620650338 | SW1/ 2SW1/ 2SW3/ 1SW3/ 2SW10/ 1SW10/ 3SW11/ 3SW11/ 2SW8/ 3SW8/ 4 |

Figura 4.16: abilene cambio

## 5. Conclusioni

All'interno di questo elaborato sono state inizialmente descritte le motivazioni che stanno spingendo la ricerca di nuove tecnologie per superare le limitazioni dell'infrastruttura di rete tradizionale. Abbiamo presentato il paradigma SDN come uno dei più promettenti per conseguire tale obiettivo e sono state discusse le implementazioni più popolari per i controller SDN. Ci siamo concentrati sull'architettura e sulle funzionalità di TeraFlow, un controller SDN emergente progettato per le reti B5G, e abbiamo analizzato i suoi meccanismi di creazione e gestione dei servizi di rete. La sperimentazione si è focalizzata sulla creazione di servizi di connettività tra due end points, l'introduzione di politiche di rete specifiche, e la verifica della risposta del sistema a condizioni introdotte artificialmente. I test sono stati resi possibili dall'emulatore di rete Mininet. La valutazione è stata fatta su prove di raggiungibilità e di performance che, pur essendo abbastanza semplici, rappresentano un punto di partenza per analisi più complesse ed eseguibili su reti più ampie. In una rete reale, tuttavia, andrebbero svolti ulteriori accertamenti per garantire le stesse performance.

Durante la sperimentazione si sono riscontrate delle problematiche dovute alla mancanza di implementazione di alcune funzioni che hanno limitato lo sviluppo completo delle funzionalità desiderate.

Nonostante queste limitazioni, l'approccio sperimentale adottato ha permesso di ottenere risultati significativi, evidenziando la capacità del sistema di rispondere a condizioni di rete variabili e di applicare politiche di gestione del traffico in modo efficace.

Per lavori futuri si potrebbe pensare di implementare il servizio tramite interfaccia Web. Attualmente la creazione dei servizi tramite WebUI non supporta il tipo L2MV utilizzato in questa sperimentazione.

Si potrebbe inoltre sperimentare con topologie più grandi e politiche più complesse per approfondire ulteriormente le capacità e i limiti del sistema. Infine, si potrebbero verificare le stesse prove con altri protocolli e tipi di switch differenti da P4, ampliando così le possibilità di applicazione e la robustezza delle soluzioni proposte.

## 6. Appendice

### 6.1 Installazione ODL

Il controller viene eseguito all'interno di una Java Virtual Machine (JVM), quindi è necessario verificare quali versioni di Java supporta la distribuzione che si decide di installare. La versione stabile più recente di ODL è compatibile con le versioni di Java superiori alla 17, mentre per le versioni più datate quest'ultime non vanno bene. Per l'installazione si deve scaricare la distribuzione desiderata che si trova sul loro sito ufficiale nella pagina di download del software [86]. Successivamente è necessario fare l'unzip del file, navigare nella cartella e eseguire il seguente comando da terminale per avviare il controller.

```
./bin/karaf
```

La versione di ODL dell'immagine 6.1 è Potassium.



```
PS C:\Users\ferra\Downloads\karaf-0.19.2\karaf-0.19.2> ./bin/karaf
Apache Karaf starting up. Press Enter to open the shell now...
100% [=====]
Karaf started in 23s. Bundle stats: 349 active, 350 total

Hit '<tab>' for a list of available commands
and '[cmd] --help' for help on a specific command.
Hit '<ctrl-d>' or type 'system:shutdown' or 'logout' to shutdown OpenDaylight.
```

Figura 6.1: Installazione ODL

Successivamente, si può trovare una lista completa delle feature disponibili eseguendo il seguente comando.

```
feature:list
```

Per installarle invece

```
feature:install <feature1> <feature2>..
```

```
opendaylight-user@root>feature:list
```

| Name                                    | Description                                       | Version | Required | State       | Repository                              |
|---|---|---------|----------|-------------|---|
| odl-bgpcep-concepts                     | OpenDaylight :: BGPCEP :: Concepts                | 0.20.6  |          | Uninstalled | odl-bgpcep-concepts-0.20.6              |
| odl-bgpcep-routing-policy-config-loader | OpenDaylight :: BGPCEP :: BGP Routing Policy Conf | 0.20.6  |          | Uninstalled | odl-bgpcep-routing-policy-config-loader |
| odl-mdsal-uint24-netty                  |   | 0.0.0   |          | Uninstalled | odl-mdsal-uint24-netty                  |
| odl-mdsal-rfc8294-netty                 | OpenDaylight :: MD-SAL :: RFC8294 :: Netty        | 12.0.4  |          | Uninstalled | odl-mdsal-uint24-netty                  |
| odl-mdsal-binding-runtime               | OpenDaylight :: MD-SAL :: Binding Runtime         | 12.0.4  |          | Started     | odl-mdsal-binding-runtime               |
| odl-ws-rs-api                           | OpenDaylight :: Javax WS RS API                   | 13.0.10 |          | Started     | odl-ws-rs-api                           |

Figura 6.2: Alcune features disponibili

## 6.2 Script Agent per latenza e packet loss

## 6.3 Script policyAddService

## 6.4 script ping2 latenza e packet loss

# Bibliografia

- [1] Babak Darabinejad. An introduction to software-defined networking. *International Journal of Intelligent Information Systems*, 3:71, 11 2014.
- [2] Bhargavi Goswami. Experimenting with onos scalability on software defined network. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*, 10:1820–1830, 01 2019.
- [3] Gonzalez Carlos Javier. *Management of a heterogeneous distributed architecture with the SDN*. PhD thesis, 12 2017.
- [4] T Kubernetes. Kubernetes. *Kubernetes*. Retrieved May, 24:2019, 2019.
- [5] Alberto Mozo, Amit Karamchandani, Luis Cal, Sandra Gómez-Canaval, Antonio Pastor, and Lluís Gifre. A machine-learning-based cyberattack detector for a cloud-based sdn controller. *Applied Sciences*, 13:4914, 04 2023.
- [6] D3.2: Final evaluation of life-cycle automation and high performance sdn components. *teraflow-h2020.eu*, 2023.
- [7] K. Indrasiri and D. Kuruppu. *gRPC: Up and Running: Building Cloud Native Applications with Go and Java for Docker and Kubernetes*. O'Reilly Media, 2020.
- [8] Protocol buffer delle componenti in teraflow. <https://gitlab.com/teraflow-h2020/controller/-/tree/develop/proto>.
- [9] Ya Gao and Zhenling Wang. A review of p4 programmable data planes for network security. *Mobile Information Systems*, 2021(1):1257046, 2021.
- [10] B. Martini, M. Gharbaoui, and P. Castoldi. Intent-based zero-touch service chaining layer for software-defined edge cloud networks. *Computer Networks*, 212:109034, 2022.

- [11] Andrea Biancini, Mauro Campanella, Luca Prete, and Fabio Farina. Software defined networking esperienze openflow e l'interesse per cloud. 04 2013.
- [12] Maede Zolanvari. Sdn for 5g. 2015.
- [13] Le prospettive del 5g. *aeit*, 104(11/12):39–41, 2018. [https://www.aeit.it/aeit/edicola/aeit/aeit2018/aeit2018\\_06\\_cisa/aeit2018\\_06\\_riv.pdf](https://www.aeit.it/aeit/edicola/aeit/aeit2018/aeit2018_06_cisa/aeit2018_06_riv.pdf).
- [14] Laura Zanotti. Intent-based networking (ibn): significato e vantaggi del networking basato sugli intenti. *ZeroUno*, 2019.
- [15] Yiming Wei, Mugen Peng, and Yaqiong Liu. Intent-based networks for 6g: Insights and challenges. *Digital Communications and Networks*, 6(3):270–280, 2020.
- [16] Etsi. <https://www.etsi.org/>.
- [17] Onos. <https://opennetworking.org/onos/>.
- [18] Opendaylight. <https://www.opendaylight.org/>.
- [19] Daniel Barattini. Supporto a micro-servizi per controller ad alta scalabilità e affidabilità. Master's thesis, Alma mater studiorum - universita' di Bologna, 2020.
- [20] Routing information protocol. *IBM*, 2023. <https://www.ibm.com/docs/en/i/7.3?topic=routing-information-protocol>.
- [21] Muhammad Fauzan Rafi Sidiq Widjonarto. Application of dijkstra algorithm on ospf routing protocol and its effect in modern networks, 2018. 13518147.
- [22] William Stallings. *Foundations of Modern Networking: SDN, NFV, QoE, IoT, and Cloud*. Pearson Education, 2015. Accessed: 6 September 2024.
- [23] Diego Kreutz, Fernando Ramos, Paulo Veríssimo, Christian Esteve Rothenberg, Siamak Azodolmolky, and Steve Uhlig. Software-defined networking: A comprehensive survey. *ArXiv e-prints*, 103, 06 2014.
- [24] Open networking foundation. <https://opennetworking.org/>.



- [25] Nicholas Brasini. *Analisi e sviluppo di un'interfaccia web per gestire controller SDN*. PhD thesis, Alma mater studiorum - universita' di Bologna, 2017.
- [26] Yustus Eko Oktian, SangGon Lee, HoonJae Lee, and JunHuy Lam. Distributed sdn controller system: A survey on design choice. *Computer Networks*, 121:100–111, 2017.
- [27] Diego Kreutz, Fernando M. V. Ramos, Paulo Esteves Veríssimo, Christian Esteve Rothenberg, Siamak Azodolmolky, and Steve Uhlig. Software-defined networking: A comprehensive survey. *Proceedings of the IEEE*, 103(1):14–76, 2015.
- [28] B. Martini, M. Gharbaoui, and P. Castoldi. Intent-based zero-touch service chaining layer for software-defined edge cloud networks. *Computer Networks*, 212:109034, 2022.
- [29] MEC. url: <https://www.etsi.org/technologies/multi-access-edge-computing>.
- [30] Nfv. <https://www.etsi.org/technologies/nfv>.
- [31] Ietf. <https://www.ietf.org/>.
- [32] Hao Yu, Hamid Rahimi, Carl Janz, et al. Building a comprehensive intent-based networking framework: A practical approach from design concepts to implementation. *Journal of Network and Systems Management*, 32:47, 2024.
- [33] Nathan Sousa, Nazrul Islam, Danny Perez, and Christian Esteve Rothenberg. Policy-driven network traffic rerouting through intent-based control loops. 07 2019.
- [34] B. Martini, M. Gharbaoui, and P. Castoldi. Intent-based network slicing for sdn vertical services with assurance: Context, design and preliminary experiments. *Future Generation Computer Systems*, 142:101–116, 2023.
- [35] Osgi. <https://www.osgi.org/>.
- [36] Apache karaf. <https://kafka.apache.org/>.

- [37] Ashwin Rajaratnam, Ruturaj Kadikar, Shanthi Prince, and M. Valarmathi. Software defined networks: Comparative analysis of topologies with onos. In *2017 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, pages 1377–1381, 2017.
- [38] Davide Sanvito, Daniele Moro, Mattia Gullì, Ilario Filippini, Antonio Capone, and Andrea Campanella. Onos intent monitor and reroute service: enabling plug&play routing logic. *2018 4th IEEE Conference on Network Softwarization and Workshops (NetSoft)*, pages 272–276, 2018.
- [39] Putri Monika, Ridha Negara, and Danu Sanjoyo. Performance analysis of software defined network using intent monitor and reroute method on onos controller. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 9(5):2065–2073, 2020.
- [40] Lfnetworking. <https://lfnetworking.org/>.
- [41] Giacomo Ondesca. *Monitoraggio di rete con tecnologie SDN (Software-Defined Networking)*. PhD thesis, Politecnico di Torino, 2021.
- [42] Benedetta Contigiani. *Improving network management with Software-Defined Networking*. PhD thesis, Università degli studi di Camerino, 2016.
- [43] Modulo nic di odl. [https://test-odl-docs.readthedocs.io/en/stable-boron/user-guide/network-intent-composition-\(nic\)-user-guide.html#](https://test-odl-docs.readthedocs.io/en/stable-boron/user-guide/network-intent-composition-(nic)-user-guide.html#).
- [44] Confluence. Network intent composition proposal, 2021.
- [45] Kubernetes. <https://kubernetes.io/>.
- [46] CNCF. url: <https://www.cncf.io/>.
- [47] Brendan Burns, Joe Beda, Kelsey Hightower, and Lachlan Evenson. *Kubernetes: up and running*. ” O’Reilly Media, Inc.”, 2022.
- [48] D1.4: Final project periodic report. *teraflow-h2020.eu*, 2023.

- [49] Nicola Dragoni, Saverio Giallorenzo, Alberto Lluch Lafuente, Manuel Mazzara, Fabrizio Montesi, Ruslan Mustafin, and Larisa Safina. Microservices: yesterday, today, and tomorrow. *Present and ulterior software engineering*, pages 195–216, 2017.
- [50] *Indagine statistica sull’uso dei microservizi*. url: <https://www.statista.com/statistics/1233937/microservices-adoption-level-organization/>.
- [51] Zhijun Ding, Song Wang, and Changjun Jiang. Kubernetes-oriented microservice placement with dynamic resource allocation. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 11(2):1777–1793, 2023.
- [52] Teraflow. <https://www.teraflow-h2020.eu/%>.
- [53] Progetto horizon 2020. [https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-2020\\_en](https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-2020_en).
- [54] TeraFlow. *5GPPP*, 2021. url: <https://5g-ppp.eu/teraflow/>.
- [55] D2.2 - preliminary requirements, architecture design, techno-economic studies and data models. *teraflow-h2020.eu*, 2023.
- [56] Teraflowsdn core components. <https://www.teraflow-h2020.eu/blog/teraflowsdn-core-components>, 2021.
- [57] D3.1: Preliminary evaluation of life-cycle automation and high performance sdn components. *teraflow-h2020.eu*, 2022.
- [58] Daniel Adanza, Lluís Gifre, Pol Alemany, Juan-Pedro Fernández-Palacios, Oscar González de Dios, Raul Muñoz, and Ricard Vilalta. Enabling traffic forecasting with cloud-native sdn controller in transport networks. *Computer Networks*, 250:110565, 2024.
- [59] Grafana. <https://grafana.com/>.
- [60] D5.3 final demonstrators and evaluation report. *teraflow-h2020.eu*, 2023.

- [61] grpc. <https://grpc.io/>.
- [62] Jong-Kun Lee. A group management system analysis of grpc protocol for distributed network management systems. In *SMC'98 Conference Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (Cat. No.98CH36218)*, volume 3, pages 2507–2512 vol.3, 1998.
- [63] F. Paolucci, A. Sgambelluri, M. Dallaglio, F. Cugini, and P. Castoldi. Demonstration of grpc telemetry for soft failure detection in elastic optical networks. In *2017 European Conference on Optical Communication (ECOC)*, pages 1–3, 2017.
- [64] Ricard Vilalta, Noboru Yoshikane, Ramon Casellas, Ricardo Martínez, Shohei Bep-pu, Daiki Soma, Seiya Sumita, Takehiro Tsuritani, Itsuro Morita, and Raul Muñoz. Grpc-based sdn control and telemetry for soft-failure detection of spectral/spacial superchannels. In *45th European Conference on Optical Communication (ECOC 2019)*, pages 1–4, 2019.
- [65] Hari Krishna and Rinki Sharma. Comparative study of orchestration using grpc api and rest api in server creation time: An openstack case. *International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC)*, 16(1), jan 2024. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4710302>.
- [66] Hackfest 3. <https://labs.etsi.org/rep/groups/tfs/-/wikis/TFS-HACKFEST-3>.
- [67] Link alla macchina virtuale per l’hackfest 3. <https://drive.google.com/file/d/10aukXmAC1uaeIACHkEpvBB9mSkUHimsR/view>.
- [68] Mininet. <https://mininet.org/>.
- [69] Francesco Cristiano. *Emulazione distribuita di reti di telecomunicazioni su piattaforma Mininte*. PhD thesis, Alma Mater Studiorum- Università di Bologna, 2013.
- [70] Mininet overview. <https://mininet.org/overview/>.

- [71] Nikhil Handigol Bob Lantz and Vimal Jeyakumar Brandon Heller. *Introduction to Mininet*. url: <https://github.com/mininet/mininet/wiki/Introduction-to-Mininet>.
- [72] Mininet.org. *Mininet Walkthrough*. url: <https://mininet.org/walkthrough/>.
- [73] P4. <https://p4.org/>.
- [74] Pat Bosshart, Dan Daly, Glen Gibb, Martin Izzard, Nick McKeown, Jennifer Rexford, Cole Schlesinger, Dan Talayco, Amin Vahdat, George Varghese, and David Walker. P4: programming protocol-independent packet processors. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 44(3):87–95, jul 2014.
- [75] *File ServiceServiceServicerImpl*. url: <https://labs.etsi.org/rep/tfs/controller/-/blob/master/src/service/service/ServiceServiceServicerImpl.py>.
- [76] *File Constraint*. url: [https://labs.etsi.org/rep/tfs/controller/-/blob/master/src/common/tools/object\\_factory/Constraint.py](https://labs.etsi.org/rep/tfs/controller/-/blob/master/src/common/tools/object_factory/Constraint.py).
- [77] Panagiotis Famelis, Georgios P. Katsikas, Vasilios Katopodis, Carlos Natalino, Lluís Gifre Renom, Ricardo Martinez, Ricard Vilalta, Dimitrios Klonidis, Paolo Monti, Daniel King, and Adrian Farrel. P5: Event-driven policy framework for p4-based traffic engineering. In *2023 IEEE 24th International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR)*, pages 1–3, 2023.
- [78] *File KpiSampleType*. url: <https://labs.etsi.org/rep/tfs/controller/-/blob/master/src/context/service/database/models/enums/KpiSampleType.py>.
- [79] *File Operatori Numerici*. url: <https://labs.etsi.org/rep/tfs/controller/-/blob/master/src/policy/src/main/java/org/etsi/tfs/policy/policy/model/NumericalOperator.java>.
- [80] *File Azioni Policy*. url: [https://labs.etsi.org/rep/tfs/controller/-/blob/master/proto/policy\\_action.proto](https://labs.etsi.org/rep/tfs/controller/-/blob/master/proto/policy_action.proto).

- [81] P4 Language. *Behavioural model (bmv2) reference P4 software switch*, mar 2023. Available: <https://github.com/p4lang/behavioral-model>.
- [82] Topologia mininet 4 switch. <https://labs.etsi.org/rep/tfs/controller/-/blob/master/src/tests/hackfest3/mininet/4switch2path.py>.
- [83] Cartella p4. <https://labs.etsi.org/rep/tfs/controller/-/tree/master/src/tests/p4>.
- [84] Wikipedia contributors. Abilene network — Wikipedia, the free encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Abilene\\_Network&oldid=1220796057](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Abilene_Network&oldid=1220796057), 2024. [Online; accessed 17-August-2024].
- [85] *File Mininet per la topologia Abilene.* url: <https://github.com/sjas/assessing-mininet/blob/master/parser/topologies/Abilene.graphml-generated-Mininet-Topo.py>.
- [86] Installazione opendaylight. <https://docs.opendaylight.org/en/latest/downloads.html>.