



UNIVERSITÀ DI PARMA

Dipartimento di Ingegneria e Architettura
Corso di Laurea in Ingegneria Informatica, Elettronica e delle
Telecomunicazioni

Titolo Italiano

English Title

Relatore:

Chiar.mo Prof. Michele Amoretti

Correlatore:

Dott. Ing. Gabriele Penzotti

Tesi di Laurea di:
Filippo Scaramuzza

ANNO ACCADEMICO 2020-2021

Ai miei genitori.

Ringraziamenti

Indice

Introduzione	1
1 Stato dell'Arte	2
1.1 Cloud Computing nell'Era dei Big Data	2
1.2 Fog Computing ed Altri Paradigmi nel Cloud-to-Thing Con- tinuum	3
1.2.1 Possibili Applicazioni del Fog Computing	6
Smart Vehicles e Traffic Control	6
Smart Cities e Smart Buildings	8
1.2.2 Altri Paradigmi	9
Mobile Cloud Computing e Cloudlet Computing	9
Multi-access Edge Computing	10
Mist Computing	10
1.3 Simulatori di Fog Computing	11
1.3.1 YAFS, <i>Yet Another Fog Simulator</i>	11
2 Architettura del Sistema Simulato	14
2.1 Struttura e Funzionamento di YAFS	14
2.1.1 Topologia e Modellazione delle Entità	14
2.1.2 Modellazione delle Applicazioni	16
2.1.3 Politiche dinamiche	17
2.2 Descrizione dello scenario simulato	19
2.2.1 Architettura a livelli	21
Livello IoT/Edge	21

Livello Fog $L0$	22
Livello Fog $L1$	22
Livello Fog $L2$	22
Livello Cloud	23
2.2.2 Interconnessioni tra Livelli e Scambio di Messaggi . . .	23
3 Sviluppo ed Utilizzo	24
3.1 Sistema Realizzato per Simulazioni ed Analisi	24
3.2 Implementazione delle Fasi di Simulazione	25
3.2.1 Service Placement	25
4 Risultati	27
4.1 Simulazioni	27
Conclusioni	28
A Appendice	29
Bibliografia	30

Introduzione

Capitolo 1

Stato dell'Arte

1.1 Cloud Computing nell'Era dei Big Data

Il NIST (*National Institute of Standards and Technology*) definisce il *Cloud Computing* come un modello che promuove l'accesso globale alle risorse informatiche condivise, tipicamente *on-demand* [1]. L'infrastruttura di questo paradigma, nella sua versione più semplice, è relegata principalmente in *data center*, ovvero dei raggruppamenti di risorse virtualizzate altamente accessibili che possono essere riconfigurate dinamicamente per garantire la scalabilità dei servizi. Questi fungono da nodi centrali e garantiscono agli utenti un'infrastruttura, una piattaforma oppure un servizio software utile per le loro applicazioni e i propri scopi (IaaS, Paas, SaaS).

Nonostante il *Cloud Computing* abbia indubbiamente un ruolo chiave nel rendere accessibile una potenza di calcolo altrimenti troppo difficile da poter essere realizzata in proprio, nella moderna era dei Big Data il tempo richiesto per accedere ad alcune applicazioni *Cloud-based*, che concentrano l'intera elaborazione dei dati nei suddetti *data-center*, potrebbe essere troppo elevato e rendere questo paradigma impraticabile per applicazioni *real-time* o, in generale, ovunque la latenza debba essere ridotta al minimo. Inoltre l'ormai noto incremento dei dispositivi connessi in ambito IoT (*Internet of Things*)

ed il relativo rapido aumento dei dati generati nell'*edge*¹ della rete richiedono che le risorse di calcolo siano geograficamente situate il più vicino possibile ai dispositivi stessi, così da diminuire al massimo la latenza, aumentando di conseguenza il *throughput* della rete.

Per affrontare queste problematiche è quindi necessario garantire il cosiddetto *Cloud-to-Thing Continuum*, ovvero la possibilità di rendere disponibili potenza computazionale, di storage e di networking ovunque nella rete, dal Cloud agli end-nodes. In questo ambito sono state avanzate numerose proposte, ad esempio il *Fog Computing*, sia in ambito industriale che accademico [2, 3].

1.2 Fog Computing ed altri paradigmi nel Cloud-to-Thing Continuum

Con *Fog Computing* si intende un'architettura a livello di sistema che distribuisce le funzioni di elaborazione, archiviazione, controllo e rete più vicine agli utenti lungo un *Cloud-to-Thing Continuum* [2].

Il *Fog Computing* dunque è innanzitutto caratterizzato da un approccio distribuito. Ciò deriva dal bisogno di superare i limiti dell'approccio centralizzato del Cloud Computing, come latenza, privacy e sovraccarico dei dati. In secondo luogo, i nodi Fog possono essere posizionati ovunque nella rete tra gli end-node e il Cloud [4]. Questa flessibilità che contraddistingue il Fog Computing sottolinea la visione di questo paradigma non come una sostituzione, bensì come un'estensione del Cloud Computing, con lo scopo di colmare il divario tra quest'ultimo e i dispositivi IoT, garantendo quindi il continuum *Cloud-to-Thing*.

Ad esempio, in un'applicazione che si occupa di analisi di Big Data prodotti da migliaia di dispositivi IoT, lo strato di Fog che si pone ad un livello

¹Con *edge* si intende la zona perimetrale della rete, in cui risiedono gli end-node. L'*edge* è caratterizzato da un punto di demarcazione (ad esempio un *gateway*) che lo separa dal *network core*, ovvero la parte centrale gestita dagli Internet Service Provider.

”più basso”, ovvero più vicino ai dispositivi rispetto al Cloud, potrebbe svolgere una funzione di filtraggio, pre-elaborazione e aggregazione del flusso dati, rendendo eventualmente disponibili alcuni risultati ai livelli inferiori e alleggerendo il carico nel Cloud, a cui rimarrebbero i task più complessi ma su una mole di dati molto ridotta e pre-elaborata.

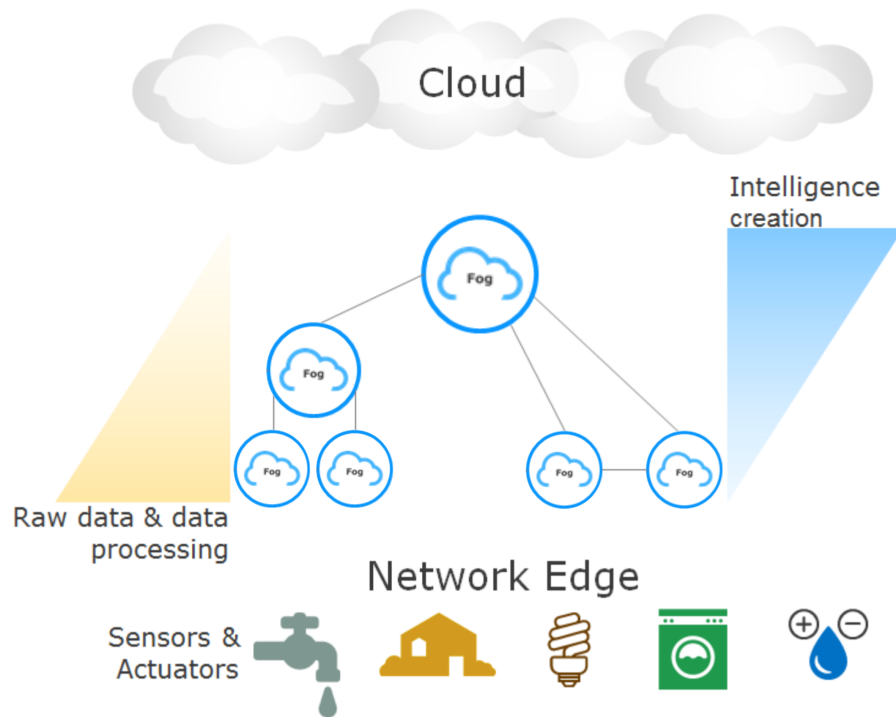


Figura 1.1: Architettura OpenFog N-Tier [2]

Negli anni sono state proposte alcune architetture di particolare rilievo per scenari di Fog Computing. Molte ricerche fanno riferimento ad un'architettura a 3 livelli, composta da Cloud, Fog e IoT [5]. Per questo lavoro di Tesi l'architettura di riferimento è quella fornita dall'*OpenFog Consortium*. Quest'ultimo è stato fondato da ARM, Cisco, Dell, Intel, Microsoft e dall'Università di Princeton, nel 2015. Ad oggi OpenFog e i suoi membri fanno parte dell'*IIC (Industrial Internet Consortium)*.

L'architettura di riferimento è detta *N-Tier Architecture*, il cui schema è mostrato in Figura 1.1. Questa mantiene comunque una struttura composta

da tre macro-entità: il Cloud, il livello Fog e gli end-node/dispositivi IoT. Il livello Fog, però, è ulteriormente scomposto in sotto-livelli (*tier*) che più si allontanano dai dispositivi, più aumentano le loro capacità computazionali. Il numero di livelli Fog da adottare dipende dai requisiti dello scenario secondo diversi parametri, ad esempio il numero di dispositivi IoT, il carico di lavoro, le capacità dei nodi ad ogni livello, i requisiti di latenza minima e così via. Inoltre i nodi Fog in ogni *tier* possono essere collegati tra loro formando una maglia capace di fornire caratteristiche aggiuntive, come resilienza, tolleranza ai guasti, bilanciamento del carico e così via. Questo significa che i nodi sono in grado di comunicare sia orizzontalmente che verticalmente all'interno dell'architettura Fog.

I vantaggi fondamentali dell'architettura di riferimento definita dall'OpenFog Consortium sono riassunti con il termine *SCALE* [2], ovvero:

- **Security.** Sicurezza aggiuntiva per garantire transazioni sicure e affidabili. Dal *Security Pillar* dell'architettura di riferimento, si evince la necessità di uno o più "nodi fidati" (*Root of Trust*) quando si trattano dati sensibili.
- **Cognition.** L'infrastruttura Fog è consapevole dei requisiti e degli obiettivi delle applicazioni, quindi distribuisce le capacità di elaborazione, comunicazione, controllo e archiviazione lungo il continuum Cloud-to-Things, creando applicazioni che soddisfano meglio le esigenze specifiche dello scenario.
- **Agility.** Lo sviluppo di un nuovo servizio è solitamente lento e costoso, a causa dei costi e dei tempi necessari ai grandi fornitori per avviare o adottare l'innovazione. Il Fog Computing, invece, offre innovazione rapida e scalabilità conveniente, in cui individui e piccoli team possono utilizzare strumenti di sviluppo aperti (ad esempio API e SDK, secondo il pilastro *Openness* definito da OpenFog [2]) e la proliferazione di dispositivi IoT per offrire nuovi servizi.

- **Latency.** L'architettura Fog supporta l'elaborazione e l'archiviazione dei dati vicino all'utente, con conseguente bassa latenza. Pertanto, il Fog computing soddisfa perfettamente la richiesta di elaborazione in tempo reale, in particolare quindi per le applicazioni *real-time*.
- **Efficiency.** Riconoscimento e condivisione delle risorse inutilizzate dei dispositivi finali che partecipano al networking.

1.2.1 Possibili Applicazioni del Fog Computing

Smart Vehicles e Traffic Control

I veicoli smart (*Smart Vehicles*) sono in grado di produrre giornalmente svariati terabyte di dati grazie alla combinazione di sensori *LIDAR*², dei sensori GPS, delle videocamere intelligenti a bordo dei veicoli per il riconoscimento delle immagini e così via. Oltre ai dati prodotti dagli *Smart Vehicles* ci sono quelli generati dai sistemi di controllo intelligenti, ovvero l'infrastruttura del *Traffic Control* (semafori intelligenti, sensori di rilevamento del traffico e delle congestioni, videocamere, ecc.). È evidente come un modello *Cloud-only* non sia adatto, vista l'enorme mole di dati, a garantire un throughput sufficientemente elevato. In quest'ambito è inoltre estremamente importante avere latenze ridotte al minimo, vista la natura *real-time* di molti vincoli decisionali [6]. Un'architettura Fog potrebbe soddisfare le particolari esigenze di questo scenario. In quest'ultimo i nodi Fog a bordo degli *Smart Vehicles* possono offrire i normali servizi di *infotainment*, ADAS³, guida autonoma, sistemi anticollisione, navigazione, e così via, comunicando per mezzo di diverse tecnologie, come DSRC (*Dedicated Short Range Communications*) o le reti cellulari (3G, LTE, 5G, ecc.).

²LIDAR (*Light Detection and Ranging*) è un metodo per determinare la presenza di oggetti, la loro forma e la loro distanza dall'osservatore utilizzando un laser e misurando il tempo necessario alla luce riflessa per tornare al trasmettitore laser.

³ADAS (*Advanced Driver Assistance Systems*) è un insieme di tecnologie che assistono il guidatore nelle operazioni di guida e parcheggio in modo sicuro.

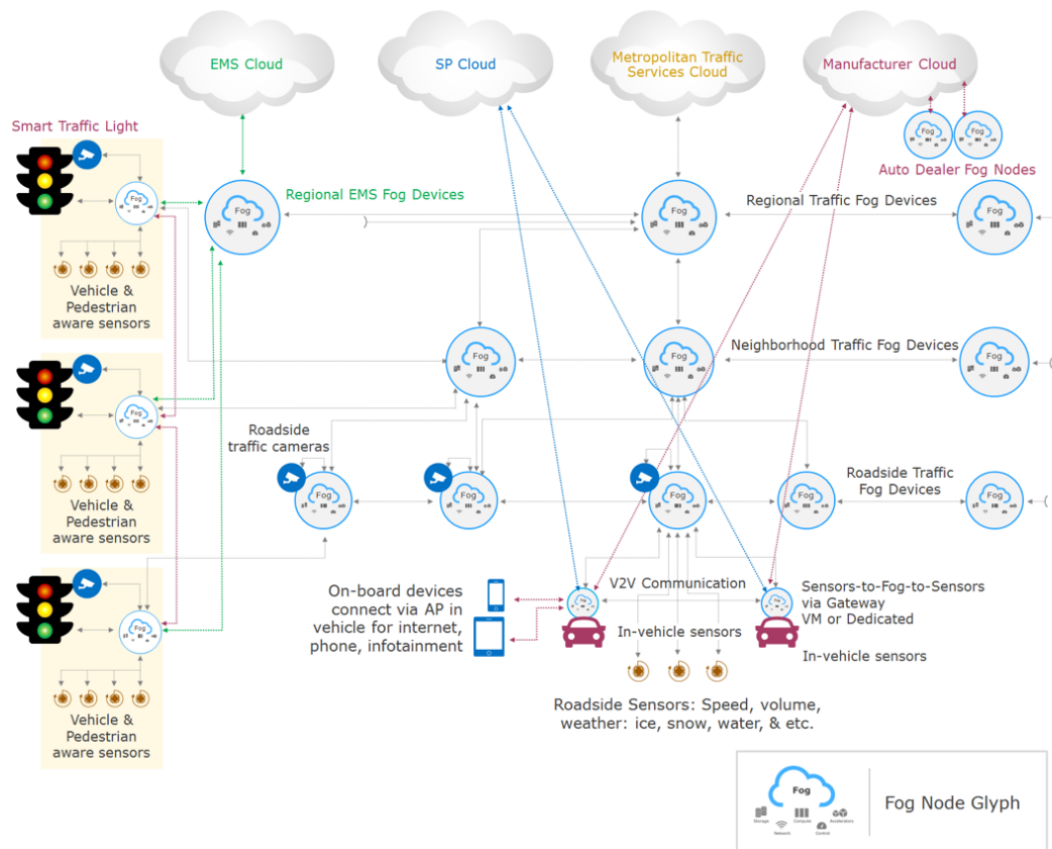


Figura 1.2: Architettura di uno scenario Fog in ambito Smart Vehicles e Traffic Control [2]

L'architettura di riferimento, mostrata in Figura 1.2, è strutturalmente gerarchica, con 3 livelli di nodi Fog. Il primo livello (*Roadside Fog Nodes*) si occupa di raccogliere i dati dai vari sensori e telecamere. I nodi Fog in questo livello eseguono alcune veloci analisi, utili ad esempio a comunicare ai veicoli in transito particolari condizioni del traffico o della strada. I dati aggregati dal primo livello sono inviati al secondo e/o al terzo livello (non c'è necessariamente una gerarchia nelle comunicazioni, questo per definizione dell'architettura Fog e della sua flessibilità), ovvero i *Neighborhood Fog Nodes* e i *Regional Fog Nodes*. In genere, ogni livello Fog nella gerarchia fornisce ulteriori capacità di elaborazione, storage e rete. Ad esempio, livelli gerarchicamente più alti garantiscono un trattamento aggiuntivo per fornire analisi

dei dati o capacità di archiviazione di grandi dimensioni, utili ad esempio per analisi sul lungo periodo o per inviare dati ad altre zone della rete stradale per particolari task.

Smart Cities e Smart Buildings

Un altro interessante impiego del Fog Computing è nell'ambito delle *Smart Cities* e degli *Smart Buildings*. Infatti sebbene la maggior parte delle città moderne disponga di una o più reti cellulari che forniscono una copertura dell'intera città, queste reti hanno spesso limiti di capacità e larghezza di banda che soddisfano appena le esigenze degli attuali abbonati. Ciò lascia poca larghezza di banda per i servizi più avanzati previsti in una città intelligente nell'era dei Big Data, come *Smart Parking*, *Traffic Control*, ospedali intelligenti, controllo sul consumo elettrico e così via.

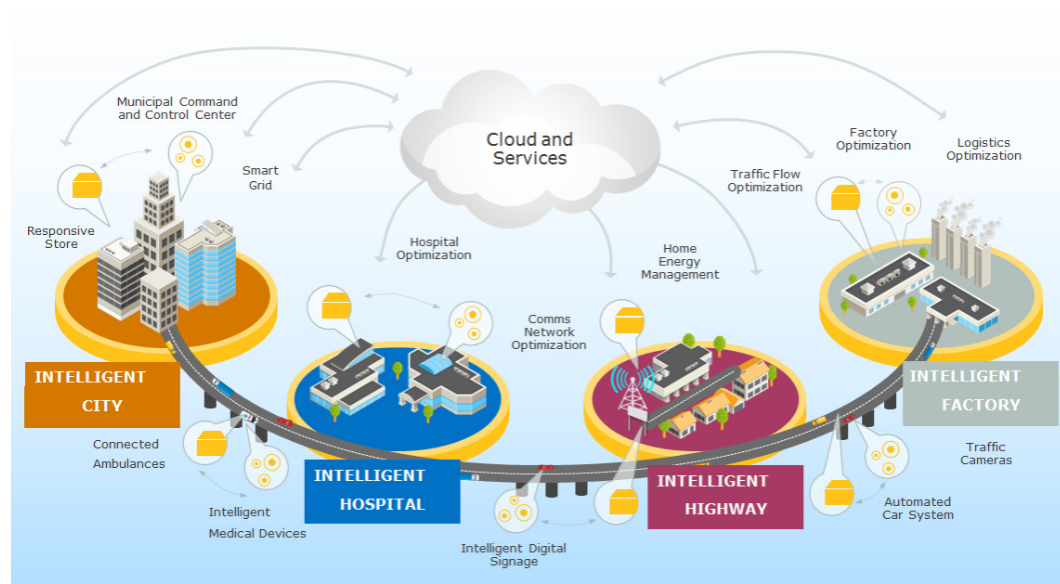


Figura 1.3: Opportunità per una *Smart City* [2]

Questo caso d'uso è già realtà, ad esempio, nella città di Barcellona, dove i risultati hanno dimostrato che il Fog Computing è la possibile chiave di volta per l'implementazione di servizi molto avanzati e complessi, in città che producono decine di milioni di Gigabyte di dati giornalmente [7].

1.2.2 Altri Paradigmi

Per analizzare i vari altri paradigmi che possono essere considerati un'estensione, più che un'alternativa al Fog Computing, è utile introdurre il concetto di *Edge Computing*. Quest'ultimo è un paradigma nato dall'esigenza di spostare la capacità di calcolo verso l'edge della rete. In [8] viene definito l'Edge Computing come *"tecnologie abilitanti che consentono di effettuare calcoli ai margini della rete sui dati, a valle per conto di servizi Cloud e a monte per conto di servizi IoT"*. L'idea è quella di estendere le capacità dal Cloud all'edge della rete, con l'obiettivo di portare la potenza di calcolo il più vicino possibile ai generatori dei dati, ovvero ai dispositivi IoT. Nonostante sia il Fog Computing che l'Edge Computing muovano le capacità computazionali vicino agli end-node, OpenFog afferma che l'Edge Computing venga erroneamente chiamato Fog Computing (e viceversa): la fondamentale distinzione sta nel fatto che il Fog Computing è strutturalmente gerarchico e fornisce potenza computazionale, networking e storage ovunque nella rete, dal Cloud agli end-node (*Cloud-to-Thing Continuum*), mentre l'Edge Computing tende ad essere limitato all'edge [2].

I principi fondanti dell'Edge Computing possono essere messi in pratica in diversi modi, in termini di tipo di dispositivi utilizzati, protocolli di comunicazione adottati e così via.

Mobile Cloud Computing e Cloudlet Computing

Il *Mobile Cloud Computing* (MCC) è basato sul concetto del *mobile offloading*: l'idea alla base, per un dispositivo mobile, è quella di delegare, quando possibile, storage e calcoli ad entità remote (ad esempio il Cloud) in modo da ridurre il carico di lavoro e ottimizzare il consumo di energia. In realtà oggi il concetto di MCC è stato esteso tenendo in considerazione i principi dell'Edge Computing. La nuova interpretazione del MCC è quella di delegare l'elaborazione e lo storage dei dati a dispositivi situati all'edge della rete, piuttosto che al Cloud. L'implementazione più comune di questa visione è

il *Cloudlet Computing* (CC), che consiste nell'utilizzare dei *Cloudlet*⁴ per eseguire elaborazione ed archiviazione dei dati vicino ai dispositivi finali.

Multi-access Edge Computing

Esattamente come il *Mobile Cloud Computing* è un'estensione del *Mobile Computing* attraverso il *Cloud Computing*, analogamente, il *Multi-access Edge Computing* (MEC) è un'estensione del *Mobile Computing* attraverso l'*Edge Computing*. In [9] il MEC viene definito come una piattaforma che fornisce funzionalità IT e di Cloud computing all'interno della *Radio Access Network* (RAN) in 4G e 5G, in prossimità dei dispositivi mobili. Il Multi-access Edge Computing è stato precedentemente definito come "*Mobile Edge Computing*", ma il paradigma è stato ampliato per includere una più ampia gamma di applicazioni oltre alle attività specifiche per dispositivi mobili. Esempi di applicazioni di MEC includono analisi video, *Smart Vehicles*, monitoraggio della salute e realtà aumentata.

Mist Computing

Spesso chiamato anche *IoT Computing*, il *Mist Computing* viene impiegato per raggiungere l'edge più estremo dei dispositivi connessi (micro-controllori e sensori) [10]. Il Mist Computing può essere visto come la prima posizione di calcolo nel continuum IoT-Fog-Cloud. Infatti può aiutare a conservare la larghezza di banda e la carica della batteria poiché sono solo i dati essenziali ad essere trasmessi al gateway, al server o al router. Inoltre il Mist Computing offre l'utilizzo di meccanismi di controllo dell'accesso ai dati che possono garantirne la riservatezza a livello locale. Di contro, questo paradigma ha che i micro-controllori e i sensori utilizzati nell'infrastruttura possono essere utilizzati solo per un'elaborazione leggera, pertanto il loro utilizzo è ristretto ad un numero piuttosto esiguo di applicazioni, a meno dell'imple-

⁴Un *Cloudlet* è una piccola infrastruttura Cloud *affidabile*, situata nell'edge della rete disponibile per i dispositivi mobili vicini, che collabora con il Cloud per servire i dati in modo più efficiente.

mentazione dello stesso nel continuum Clout-to-Thing venendo quindi incluso in un'architettura più ampia, basata ad esempio sul Fog Computing [11].

1.3 Simulatori di Fog Computing

La progettazione e l'ottimizzazione di sistemi distribuiti su larga scala richiedono una descrizione realistica del flusso dei dati, delle richieste emesse dai nodi, dei servizi disponibili e ogni aspetto necessario alla comprensione del comportamento di sistemi che scambiano enormi moli di dati. La via più semplice per comprendere le potenzialità e allo stesso tempo i limiti di scenari così complessi è quella della *simulazione*.

La ricerca nell'ambito del Fog Computing vanta un numero consistente di strumenti di simulazione più o meno avanzati. Tra i più noti vi sono *iFogSim*⁵ [12] ed *EdgeCloudSim*⁶ [13], entrambi basati su *CloudSim*, un simulatore di architetture Cloud. Oltre alla simulazione un altro importante strumento che garantisce esperimenti ripetibili e controllabili è l'*emulazione*. Tra i software più rilevanti esistono *EmuFog*⁷ [14] e *FogBed*⁸ [15]. Entrambi consentono all'utente di progettare scenari Fog con applicazioni basati su Docker o Mininet.

1.3.1 YAFS, *Yet Another Fog Simulator*

Per questo lavoro di Tesi è stato utilizzato, tra le altre cose, il simulatore *YAFS*⁹ (*Yet Another Fog Simulator*), un simulatore ad eventi discreti sviluppato in Python e basato su *SimPy*, ovvero un framework DES (*Discrete Event Simulator*) basato sui processi, anch'esso sviluppato in Python [16]. *YAFS* è progettato per analizzare e progettare applicazioni in scenari Fog e

⁵Disponibile su: <https://github.com/Cloudslab/ifogsim>

⁶Disponibile su: <https://github.com/CagataySonmez/EdgeCloudSim>

⁷Disponibile su: <https://github.com/emufog/emufog>

⁸Disponibile su: <https://github.com/fogbed/fogbed>

⁹Disponibile su: <https://github.com/acsicuib/YAFS>

incorpora le strategie per il service placement, lo scheduling e l'instradamento dei dati. Le ragioni che hanno portato alla scelta di YAFS sono esposte nel seguito.

- **Placement, Scheduling, Routing e processi personalizzati.** L'algoritmo di service placement viene invocato all'avvio e viene eseguito durante la simulazione secondo una distribuzione personalizzata. L'algoritmo di routing sceglie il percorso che collega il mittente e il destinatario e l'algoritmo di scheduling sceglie l'applicazione che deve eseguire il task associato alla richiesta. Oltre agli algoritmi appena esposti che possono essere definiti dall'utente, quest'ultimo può implementare funzioni personalizzate che possono essere invocate in fase di esecuzione per fornire implementazioni flessibili di eventi reali come il movimento delle fonti del carico di lavoro, la generazione di guasti della rete e la raccolta di dati specifici utilizzando anche applicazioni di terze parti.
- **Creazione dinamica delle sorgenti dei messaggi.** Ogni fonte di carico di lavoro rappresenta la connessione alla rete di un utente, di un sensore IoT o di un attuatore che richiede un servizio. Ogni sorgente è associata ad un'entità DES di rete che genera richieste secondo una distribuzione personalizzata. Le sorgenti del carico di lavoro possono essere create, modificate o rimosse dinamicamente, consentendo la modellazione degli spostamenti degli utenti in un generico ecosistema.
- **Topologia della rete.** YAFS basa la struttura della topologia sulla *Complex Network Theory*, grazie all'implementazione della libreria *NetworkX*, da cui deriva la possibilità di applicare tutti gli algoritmi che ne derivano, ottenendo quindi indicatori di maggior interesse sulle topologie adottate.
- **Risultati.** YAFS esegue la registrazione automatica basata su CSV di due tipi di eventi:
 - generazione del carico di lavoro e del calcolo eseguito su di esso;

- trasmissioni dei messaggi sui collegamenti.

I risultati sono salvati in formato *raw* con un'impronta noSql, con l'idea che da dati in formati più semplici derivino analisi più veloci.

Capitolo 2

Architettura del Sistema Simulato

2.1 Struttura e Funzionamento di YAFS

Per le simulazioni realizzate nel corrente lavoro di Tesi è stato fatto uso del simulatore *YAFS*¹ (*Yet Another Fog Simulator*) [16]. Quest'ultimo utilizza una libreria per la generazione e la gestione degli eventi chiamata *SimPy*², ovvero un'implementazione di un simulatore ad eventi discreti (DES, *Discrete Event Simulator*), che garantisce un'interfaccia per la definizione dei processi (i componenti attivi della simulazione) e delle risorse (ad esempio i nodi ed i collegamenti della rete).

YAFS è definito principalmente da sei classi: *Core*, *Topology*, *Selection*, *Placement*, *Population* e *Application*. Le relazioni che intercorrono tra loro sono mostrate in Figura 2.1 ed esposte nel seguito.

2.1.1 Topologia e Modellazione delle Entità

Le entità della topologia sono modellate come un insieme di *nodi* (ovvero i dispositivi della rete, come dispositivi IoT, nodi fog, server e cloudlet)

¹Disponibile su: <https://github.com/acsicuib/YAFS>

²Disponibile su: <https://simpy.readthedocs.io>

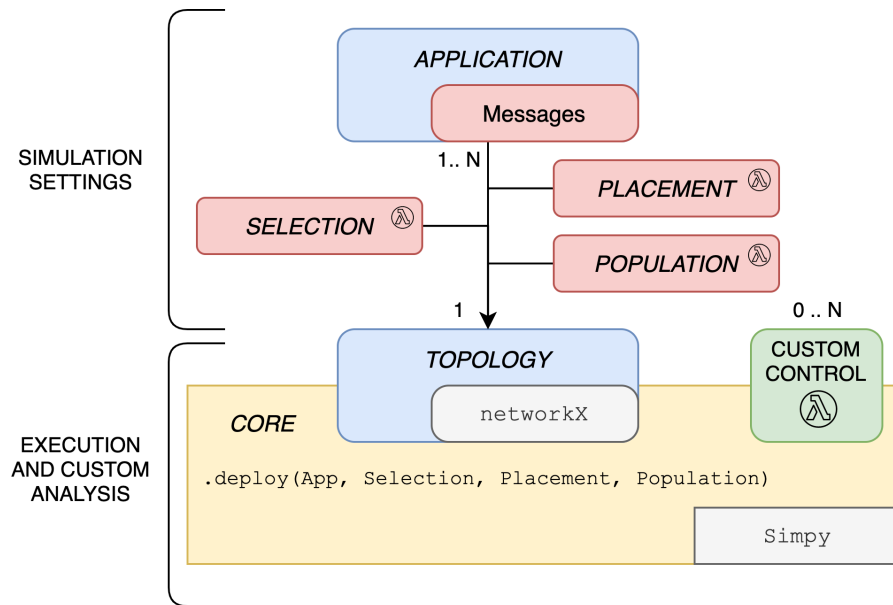


Figura 2.1: Architettura di YAFS

interconnessi da *archi* (i collegamenti di rete). La modellazione della topologia, tramite un *grafo* permette l'applicabilità della *Complex Network Theory*. Grazie all'integrazione di *NetworkX* [17], una nota libreria scritta in Python, è possibile applicare algoritmi per eseguire misure e analisi sui grafi, come il calcolo di node degree, centrality, clustering, assortativity, communities e così via. NetworkX accetta inoltre la definizione dei grafi tramite JSON, linguaggio ampiamente utilizzato per la creazione dello scenario con YAFS e permette l'esportazione dei grafi in formato GEXF, utile ad esempio per l'analisi dei grafi tramite il software *Gephi* ³.

Gli attributi obbligatori per la definizione di un nodo sono un identificativo univoco (*ID*), il numero di istruzioni eseguite dal nodo in un'unità di tempo (*IPT*) e la capacità della memoria (*RAM*). L'utente è libero di aggiungere attributi personalizzati, utili allo scenario specifico che si vuole studiare, come è stato fatto nel corrente lavoro di Tesi (maggiori informazioni sono al Capitolo 3). Un esempio di definizione dei nodi è mostrato nel Listato 2.1.

³Disponibile su: <https://gephi.org/>

```

1  {
2      "id": 120, "RAM": 1, "IPT": 530,
3      "POWERmin": 574,
4      "POWERmax": 646,
5      "coordinate":
6      {
7          "lat": 39.30, "long": 3.34
8      }
9  },
10 {
11     "id": 12, "RAM": 10, "IPT": 100
12 }

```

Listato 2.1: Definizione di due nodi Fog utilizzando la rappresentazione JSON [16]

La definizione dei collegamenti è molto simile. Questi hanno i seguenti attributi obbligatori: la larghezza di banda (BW), la velocità di propagazione (PR), l'ID del nodo sorgente (s) e l'ID del nodo di destinazione (d). I valori BW e PR sono utili al calcolo della latenza secondo la formula:

$$\frac{Message.size.bytes}{BW} + PR$$

2.1.2 Modellazione delle Applicazioni

In YAFS le applicazioni (intese come raggruppamenti di servizi), sono strutturate come dei *Distributed Data Flow* (DDF) [18]. In particolare un'applicazione è definita da un insieme di moduli che si scambiano messaggi. Infatti, un DDF è rappresentato da un *grafo diretto aciclico*, dove i nodi sono i moduli che eseguono delle azioni sui messaggi in ingresso, provenienti da un certo percorso sugli archi del grafo. Questa rappresentazione è utile al fine di garantire il partizionamento delle applicazioni e la scalabilità, ad esempio tramite l'implementazione di microservizi [19].

La definizione delle applicazioni è composta da quattro parti: *moduli* (o *servizi*), *messaggi*, *trasmissioni* e dati generali. I *moduli* possono avere diversi attributi, anche a seconda dello specifico scenario, ma quelli obbligatori sono solo un identificativo univoco (ID) e il nome ($name$). I *messaggi*, ovvero i dati scambiati, hanno principalmente due attributi obbligatori: il numero

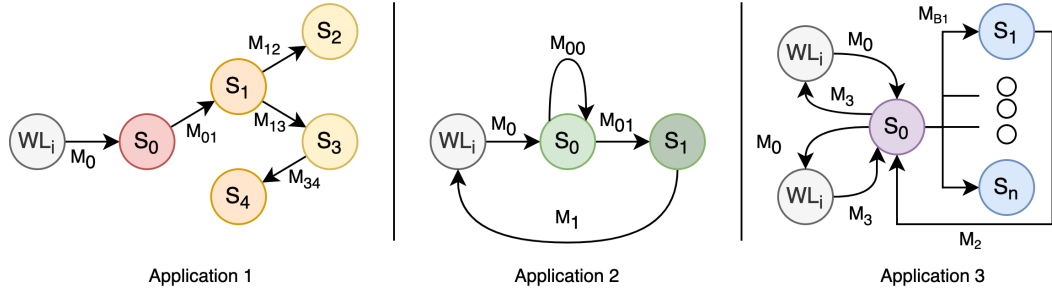


Figura 2.2: Tre tipologie di applicazioni realizzabili, con la loro rappresentazione tramite grafo.

di istruzioni (*instructions*) e la grandezza in byte (*bytes*). Le *trasmissioni* definiscono le modalità in cui i servizi scambiano le informazioni e tramite le quali si inviano dati. Gli attributi obbligatori in questo caso sono: il modulo di afferenza (*module*) e il messaggio in ingresso. Tramite la definizione delle trasmissioni è possibile, con un particolare attributo detto *fractional*, definire la probabilità di propagare un determinato messaggio *message_out* sulla ricezione di un particolare messaggio *message_in*.

In Figura 2.2 sono mostrate tre tipologie di applicazioni che sono realizzabili. La prima, **Application 1**, è strutturata gerarchicamente, con la ricezione dei messaggi M_{ij} che scatena l'invio di altri messaggi. Nella seconda applicazione, **Application 2**, è possibile osservare un'interazione di un servizio con se stesso ed infine nell'ultima applicazione, **Application 3**, è mostrato il *broadcasting* di un messaggio M_{B1} che raggiunge tutti i moduli dell'applicazione. In tutte e tre le applicazioni WL_i indica il nodo che genera il carico di lavoro (ad esempio un dispositivo IoT).

2.1.3 Politiche dinamiche

Le classi *Selection*, *Placement* e *Population* sono utili per la generazione dinamica degli eventi dello scenario. In particolare la prima definisce quali nodi devono eseguire un particolare servizio, di conseguenza indirizza il *workload*. La classe *Placement* sceglie i servizi che devono essere allocati nei

vari nodi, mentre la class *Population* posiziona i generatori del workload nei nodi della rete. Queste tre classi possiedono principalmente due interfacce: una contenente l'*initialization function* (che prepara l'allocazione dei moduli e del workload nei nodi della rete) e una contenente una funzione che viene invocata secondo una specifica distribuzione temporale.

```

1  delayActivation = deterministicDistributionStartPoint(300, 300, name='
    ↳ Deterministic')
2  periodActivation = deterministicDistribution(name='Deterministic', time=100)
3
4  popA = Statical(name='StaticalPop')
5  popA.set_sink_control({'id': a_id_fog_device, 'number': 2, 'module': appA.
    ↳ get_sink_modules()})
6  popA.set_src_control({'number': 1, 'message': appA.get_message('M.Action'),
    ↳ 'distribution': periodicActivation})
7
8  top20Devices = ['array_ids_fog_devices']
9  popB = Evolution(top20Devices, name='DynamicPop', activation_dist =
    ↳ delayActivation)
10 popB.set_sink_control({'model': 'actuator-device', 'number': 2, 'module':
    ↳ appB.get_sink_control()})
11 popB.set_src_control({'number': 1, 'message': appB.get_message('M.action'),
    ↳ 'distribution': periodicActivation})

```

Listato 2.2: Definizione di due Population policies: una statica (popA) ed una dinamica (popB) [16]

Nel Listato 2.2 è mostrato un esempio di definizione di politiche di *Population*: una statica ed una dinamica. Nelle righe 1 e 2 vengono definite due distribuzioni temporali: la prima che inizia a 3000 unità temporali e da quel punto in poi invoca un'attivazione ogni 300 unità temporali, la seconda invece che invoca un'attivazione ogni 10 unità temporali. Alla riga 4 viene generata un'istanza di una classe Population predefinita. Le applicazioni YAFS hanno due tipi di moduli: *workload sources* e *workload sinks* (rispettivamente “sensori” ed “attuatori”). Le righe 5 e 6, tramite JSON, definiscono l'allocazione dei moduli sink e dei moduli source con una specifica distribuzione e il tipo di messaggio che questi devono trattare.

Nel caso della seconda politica di *Population*, viene utilizzato un modello più complesso (righe 8-11): alla riga 9 viene istanziato un oggetto Evolution

(Listato 2.3). Questo segue la distribuzione di riga 1, dunque, il processo DES creato, inizia a produrre messaggi dopo un certo intervallo di tempo secondo una specifica scadenza. Ad ogni attivazione il processo creato genera workload con le caratteristiche definite alla riga 11.

```

1
2 class Evolution(population):
3     def __init__(self, listIDEntities, **kwargs):
4         # initialization of internal variables
5         super(Evolutionm self).__init__(**kwargs)
6
7     def initial_allocation(self, sim, app_name):
8         # dealing assignments
9         sim.deploy_sink(app_name, node=fog_device, module=module)
10
11    def run(self, sim):
12        # dealing assignments: msg, distribution and app_name
13        id = ... # listIDEntities.next
14        idsrc = sim.deploy_source(app_name, id_node=id, msg=...,
    ↪ distribution=...)

```

Listato 2.3: Struttura di una classe Population [16]

Nel Listato 2.3 è mostrata una versione semplificata della classe Evolution. In questo tipo di classi è sempre presente una funzione obbligatoria chiamata `initial_allocation` e, facoltativamente, una funzione chiamata `run` che viene chiamata secondo l'eventuale distribuzione temporale specificata.

2.2 Descrizione dello scenario simulato

L'architettura di riferimento per la definizione dello scenario simulato è illustrata in Figura 2.3.

Tra i vari aspetti considerati durante la definizione della topologia di rete si è voluto enfatizzare il concetto del Fog Computing come “architettura verticale”. Dall'esempio in Figura 2.3 è infatti possibile evincere una struttura della rete gerarchica ed a livelli. Ogni livello è caratterizzato da diverse capacità di elaborazione, in base ai servizi offerti alla rete: un nodo a livelli più bassi offre pochi servizi, ma generalmente produce molti dati (ad esempio

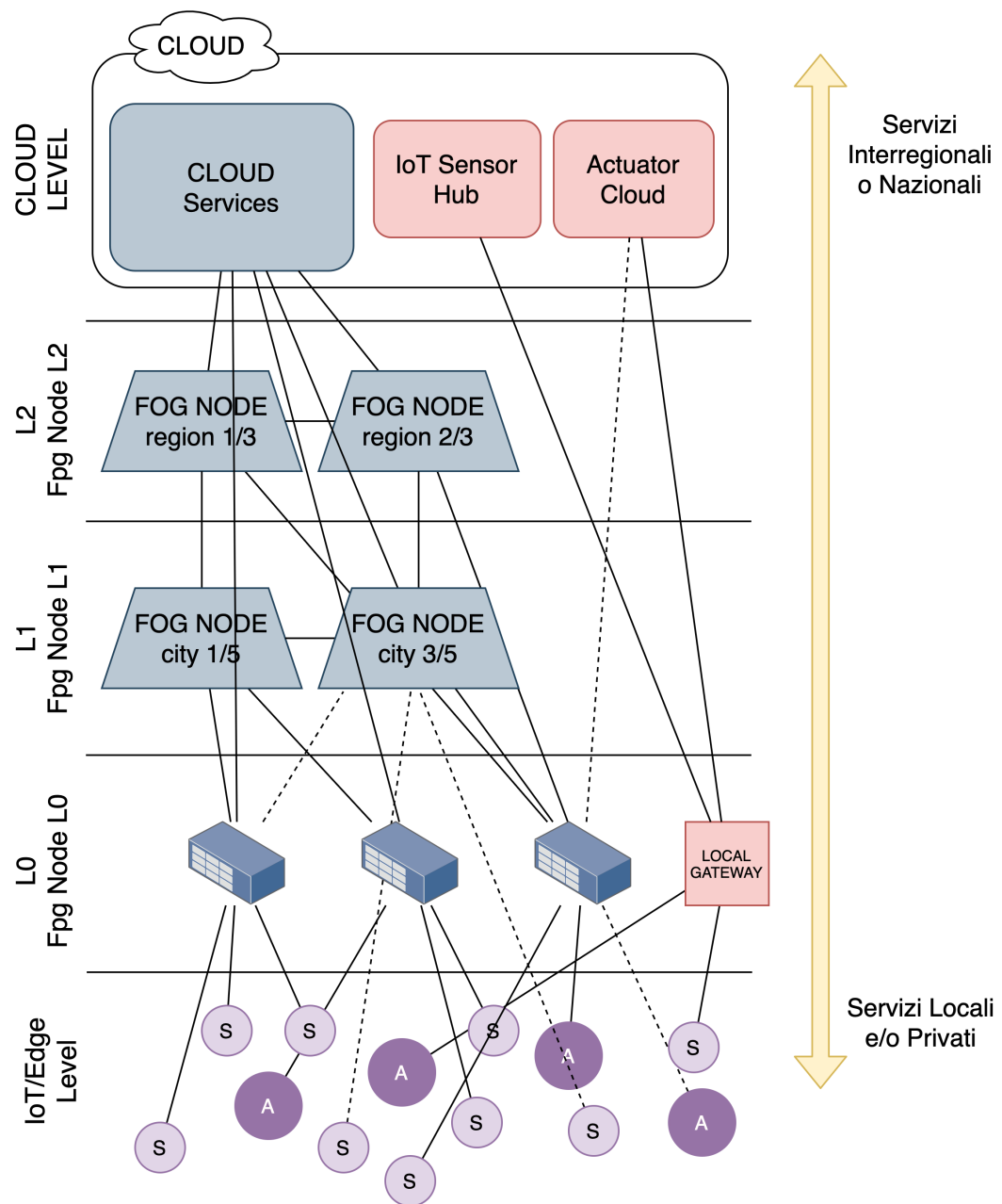


Figura 2.3: Architettura dello scenario simulato

i dispositivi IoT), mentre un nodo a livelli più alti non genera dati *propri*, ma piuttosto offre una rielaborazione dei dati ricevuti dai livelli più bassi offrendo molti servizi alla rete.

Un fattore di particolare rilevanza è inoltre la *raggiungibilità*. Ricordando infatti la necessità di rendere i servizi della rete disponibili anche nelle zone più remote della stessa, ovvero vicino all'*edge* per ridurre al minimo la latenza, i nodi appartenenti a livelli più bassi sono più radicati nel territorio ed ognuno di essi è raggiungibile da aree via via più limitate e circoscritte.

2.2.1 Architettura a livelli

Il sistema simulato nel corrente lavoro di Tesi offre degli spunti per l'implementazione del Fog Computing in scenari anche molto differenti tra loro. Infatti viene proposta una architettura a livelli molto flessibile e adattabile a diversi tipi di implementazioni, che possono avere una estensione provinciale o regionale.

Livello IoT/Edge

In questo livello vengono raggruppati i sensori e gli attuatori che rientrano nell'ambito IoT, cioè dispositivi caratterizzati da una bassa capacità computazionale, scarsa alimentazione, discontinuità e mobilità. I dispositivi che operano in questo livello utilizzano protocolli di comunicazione a basso consumo, con un *payload* ridotto e tempi di *sleep* prolungati. La caratteristica fondamentale di questi dispositivi è infatti che, per ridurre i consumi, rimangono per tempi molto prolungati in una fase di *sleep*, nella quale il dispositivo resta senza alimentazione (tranne per la circuiteria fondamentale), per poi passare allo stato di *awake*, nel quale vengono eventualmente inviati o ricevuti i dati, tornando immediatamente nello stato di *sleep*.

In questo livello vengono inclusi anche i cosiddetti nodi *edge*, il cui scopo è quello di eseguire validazione o controllo dei dati inviati o ricevuti. In particolare questi dispositivi sono generalmente centraline per attuatori o stazioni per sensori più performanti che possono controllarne un numero più consistente.

Livello Fog $L0$

In questo livello sono raggruppati i nodi che forniscono i servizi che non rientrano strettamente nell'ambito IoT, ma che non ne offrono ai livelli superiori. Sono i cosiddetti *gateway*, spesso privati, che raggruppano sensori e attuatori di zone circoscritte per il loro monitoraggio.

Livello Fog $L1$

In questo livello si trovano i nodi che si occupano di raccogliere ed aggregare i dati provenienti da più zone. Idealmente questi nodi hanno una copertura provinciale o sub-provinciale. Questi offrono diversi servizi alla rete, sia ai i livelli superiori che ai quelli inferiori, ad esempio fornendo raccolta dati per il mantenimento dello storico per i livelli inferiori e fornendo pre-elaborazione degli stessi per i livelli superiori. Le capacità di questi nodi sono piuttosto limitate, ma hanno il grande vantaggio di essere replicabili al fine di garantire la scalabilità. Nel caso di sovraccarico è inoltre possibile sfruttare ad esempio l'operazione di *offloading*⁴ su nodi vicini dello stesso livello.

Livello Fog $L2$

I nodi presenti in questo livello (e negli eventuali successivi Livelli Fog LN) hanno una copertura maggiore rispetto a quella dei livelli precedenti, ad esempio regionale o sub-regionale. Come anticipato in questo modello architetturale, i nodi ai livelli superiori hanno capacità computazionali via via sempre maggiori, in grado quindi di aggregare maggiormente i dati, effettuare veloci analisi statistiche o implementare algoritmi di Machine Learning distribuiti.

⁴Con *offloading* si intende il trasferimento di attività computazionali ad alta intensità ad un processore separato, come un acceleratore hardware o ad una piattaforma esterna, come un cluster o il cloud. L'*offload* dell'elaborazione su un nodo esterno può fornire maggiore potenza di elaborazione e superare i limiti hardware di un dispositivo, come potenza di calcolo, archiviazione ed energia limitate.

Livello Cloud

In questo livello vengono raggruppati i servizi controllati dai produttori dei sensori e degli attuatori, nonché i servizi che richiedono risorse elevate per eseguire, ad esempio, algoritmi di Machine Learning o analisi statistiche avanzate. Nel Capitolo 3 verrà inoltre spiegato come il Cloud sia un tassello fondamentale per l'algoritmo di Placement, fungendo da “riserva” per i servizi che non trovano un nodo utile per il piazzamento.

2.2.2 Interconnessioni tra Livelli e Scambio di Messaggi

Una delle caratteristiche del Fog Computing è la flessibilità della sua implementazione. Infatti i nodi, seppur ordinati gerarchicamente, non sono necessariamente connessi con i nodi ai livelli subito successivi o precedenti, ma possono essere eventualmente connessi con qualsiasi altro livello superiore o inferiore.

Per quanto riguarda invece le interconnessioni interne ai livelli, queste seguono diverse modalità. Nel caso dei livelli IoT/Edge e Fog $L0$ generalmente non sono previste connessioni, mentre nei livelli Fog da $L1$ ad LN viene utilizzato un grafo *small-world*⁵ secondo il modello *Watts-Strogatz* [20].

Il sistema simulato è un'implementazione di un'architettura basata sullo scambio di messaggi tra i servizi. Questo avviene tramite un'operazione di *replay* dei messaggi che avviene secondo specifiche distribuzioni di probabilità, che diminuisce ai livelli superiori. Ad esempio un messaggio generato dal Livello IoT/Edge raggiunge il livello $L0$ con probabilità pari a 0.8, il livello $L1$ con probabilità pari a 0.4 e così via.

⁵Una rete *small-world*, è un tipo di grafo in cui la maggior parte dei nodi sono uno vicino (*neighbors*) dell'altro e dato un nodo, i suoi vicini sono molto probabilmente vicini tra loro, con il risultato che ogni nodo è raggiungibile dall'altro con un ridotto numero di *hop*.

Capitolo 3

Sviluppo ed Utilizzo

3.1 Sistema Realizzato per Simulazioni ed Analisi

Al fine di valutare le prestazioni degli scenari di Fog Computing, descritti al capitolo 2, è stato implementato un sistema di simulazione che ne permette in una prima fase la definizione in ogni suo aspetto (topologia, applicazioni, servizi, richieste, ecc...) e, successivamente, l'analisi dei principali aspetti utili alla comprensione dello scenario, come il successo del *service placement* e delle richieste di servizi da parte dei vari nodi della rete.

La definizione e l'esecuzione della simulazione seguono il diagramma di flusso mostrato in Figura 3.1. Come accennato è possibile eseguire due principali tipologie di analisi:

1. **Analisi del service placement.** È possibile analizzare l'andamento del service placement al variare di specifici parametri di definizione dello scenario, specificando il numero di iterazioni e quali di questi devono variare ad ogni esecuzione.
2. **Analisi della simulazione.** Una volta definito e simulato uno specifico scenario, è possibile ottenere un'analisi sul soddisfacimento delle

richieste da parte dei nodi dei vari servizi offerti dalla rete, con e senza *failure control* dei nodi/servizi.

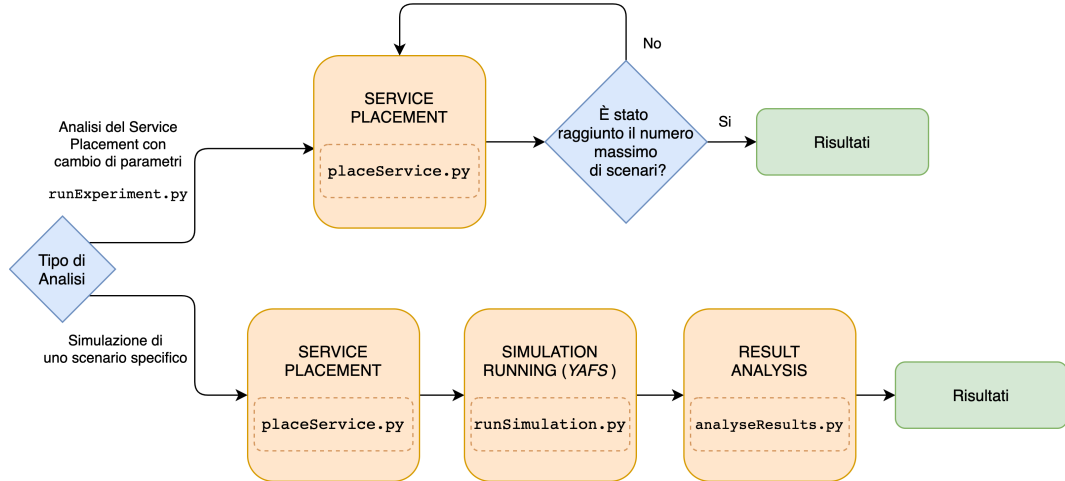


Figura 3.1: Diagramma di flusso del sistema di simulazione.

3.2 Implementazione delle Fasi di Simulazione

In questo paragrafo verranno approfonditi i singoli aspetti che compongono il processo esposto al Paragrafo 3.1, nonché il loro utilizzo per la definizione e l'esecuzione delle simulazioni.

3.2.1 Service Placement

Per ottenere il massimo beneficio dall'implementazione di un'architettura Fog, è necessario un efficace algoritmo di *service placement*. In generale questi algoritmi sono improntati a massimizzare il *Quality of Service*¹ (QoS)

¹Con *Quality of Service* si intende l'insieme dei valori che indicano la qualità del servizio offerto dalla rete, in termini di throughput, gestione degli errori, gestione dei ritardi e utilizzo della banda.

o il bilanciamento del carico, oppure a minimizzare il consumo di energia, la latenza o il costo della comunicazione.

Capitolo 4

Risultati

4.1 Simulazioni

Qui elenco delle varie simulazioni con spiegazione dei risultati ed eventuali conclusioni che da essi si ottengono.

Conclusioni

Appendice A

Appendice

Bibliografia

- [1] P. Mell and T. Grance. The nist definition of cloud computing. *NIST Special Publication 800-145*, 2011.
- [2] OpenFog. IEEE Standard for Adoption of OpenFog Reference Architecture for Fog Computing. *IEEE Std 1934-2018*, pages 1–176, 2018.
- [3] Flavio Bonomi, Rodolfo Milito, Jiang Zhu, and Sateesh Addepalli. Fog Computing and Its Role in the Internet of Things. In *Proceedings of the First Edition of the MCC Workshop on Mobile Cloud Computing*, MCC '12, page 13–16, New York, NY, USA, 2012. Association for Computing Machinery.
- [4] Pedro Neves, Bradley Schmerl, Javier Cámara, and Jorge Bernardino. Big Data in Cloud Computing: Features and Issues. pages 307–314, 01 2016.
- [5] Jie Lin, Wei Yu, Nan Zhang, Xinyu Yang, Hanlin Zhang, and Wei Zhao. A Survey on Internet of Things: Architecture, Enabling Technologies, Security and Privacy, and Applications. *IEEE Internet of Things Journal*, 4(5):1125–1142, 2017.
- [6] Andrei Furda and Ljubo Vlacic. Real-Time Decision Making for Autonomous City Vehicles. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 22:694, 08 2010.

- [7] Jordi Garcia, Ester Simó, Xavier Masip-Bruin, Eva Marín-Tordera, and Sergi Sànchez-López. Do We Really Need Cloud? Estimating the Fog Computing Capacities in the City of Barcelona. In *IEEE/ACM International Conference on Utility and Cloud Computing Companion (UCC Companion)*, pages 290–295, 2018.
- [8] Weisong Shi, Jie Cao, Quan Zhang, Youhuizi Li, and Lanyu Xu. Edge Computing: Vision and Challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(5):637–646, 2016.
- [9] F. Giust. MEC deployments in 4G and evolution towards 5G. *MEC Deployments in 4G and Evolution Towards 5G*, 2018.
- [10] Jürigo S. Preden, Kalle Tammemäe, Axel Jantsch, Mairo Leier, Andri Riid, and Emine Calis. The Benefits of Self-Awareness and Attention in Fog and Mist Computing. *Computer*, 48(7):37–45, 2015.
- [11] Manas Kumar Yogi, K. Chandra sekhar, and G. Vijay Kumar. Mist Computing: Principles, Trends and Future Direction. *International Journal of Computer Science and Engineering*, 4(7):19–21, Jul 2017.
- [12] Harshit Gupta, Amir Vahid Dastjerdi, Soumya K. Ghosh, and Rajkumar Buyya. iFogSim: A toolkit for modeling and simulation of resource management techniques in the Internet of Things, Edge and Fog computing environments. *Software: Practice and Experience*, 47(9):1275–1296, 2017.
- [13] Cagatay Sonmez, Atay Ozgovde, and Cem Ersoy. EdgeCloudSim: An environment for performance evaluation of Edge Computing systems. In *Second International Conference on Fog and Mobile Edge Computing (FMEC)*, pages 39–44, 2017.
- [14] Ruben Mayer, Leon Graser, Harshit Gupta, Enrique Saurez, and Uma-kishore Ramachandran. EmuFog: Extensible and scalable emulation of

- large-scale fog computing infrastructures. In *IEEE Fog World Congress (FWC)*, pages 1–6, 2017.
- [15] Antonio Coutinho, Fabiola Greve, Cassio Prazeres, and Joao Cardoso. Fogbed: A Rapid-Prototyping Emulation Environment for Fog Computing. In *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 1–7, 2018.
- [16] Isaac Lera, Carlos Guerrero, and Carlos Juiz. YAFS: A Simulator for IoT Scenarios in Fog Computing. *IEEE Access*, 7:91745–91758, 2019.
- [17] Aric Hagberg, Pieter Swart, and Daniel S Chult. Exploring network structure, dynamics, and function using networkx.
- [18] Nam Ky Giang, Michael Blackstock, Rodger Lea, and Victor C.M. Leung. Developing IoT applications in the Fog: A Distributed Dataflow approach. In *5th International Conference on the Internet of Things (IOT)*, pages 155–162, 2015.
- [19] Nicola Dragoni, Saverio Giallorenzo, Alberto Lluch Lafuente, Manuel Mazzara, Fabrizio Montesi, Ruslan Mustafin, and Larisa Safina. *Microservices: Yesterday, Today, and Tomorrow*, pages 195–216. Springer International Publishing, Cham, 2017.
- [20] Duncan J. Watts and Steven H. Strogatz. Collective dynamics of ‘small-world’ networks. *Nature*, 393(6684):440–442, Jun 1998.
- [21] Qiang Wu, Jun Shen, Binbin Yong, Jianqing Wu, Fucun Li, Jinqiang Wang, and Qingguo Zhou. Smart fog based workflow for traffic control networks. *Future Generation Computer Systems*, 97:825–835, 2019.
- [22] NIST. Mobile cloud computing. [online]. *Technical Report, National Institute of Standards and Technology*. <https://www.nist.gov/programs-projects/mobile-cloud-computing>.

-
- [23] Rodrigo Roman, Javier Lopez, and Masahiro Mambo. Mobile edge computing, Fog et al.: A survey and analysis of security threats and challenges. *Future Generation Computer Systems*, 78:680–698, 2018.