



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Generazione e visualizzazione grafica di traffico di reti

Facoltà di Ingegneria dell'Informazione, Informatica e Statistica
Laurea Triennale in Informatica

Francesco Pannozzo

Matricola 699427

Relatore

Prof. Daniele De Sensi

Anno Accademico 2023/2024

Tesi non ancora discussa

Generazione e visualizzazione grafica di traffico di reti

Relazione di tirocinio. Sapienza Università di Roma

© 2024 Francesco Pannozzo. Tutti i diritti riservati

Questa tesi è stata composta con L^AT_EX e la classe Sapthesis.

Email dell'autore: francesco.pannozzo@libero.it

*Dedicato alla
mia famiglia*

Sommario

Questa relazione descrive il lavoro di tirocinio interno svolto presso l'università La Sapienza, concretizzato nella realizzazione di un progetto volto a realizzare un software per poter visualizzare in forma grafica l'andamento del traffico di una rete. Il progetto ha come obiettivo di mostrare il traffico di rete al variare del tempo e ciò viene raggiunto tramite grafiche e animazioni generate programmaticamente. L'idea dell'ambito di tirocinio nasce dalla volontà di sperimentare una realizzazione front-end tramite la libreria Manim, un motore di animazioni per video matematici esplicativi. Nel capitolo dedicato all'introduzione descriveremo l'ambito in cui si è tenuto il tirocinio, le motivazioni alla base in cui è stato idealizzato l'argomento, seguito da un'analisi dello stato dell'arte attuale, descrivendo diverse realtà affini al progetto e studiandone caratteristiche, i loro pregi e mancanze. A seguire ci sarà una descrizione dei contributi che vuole dare il progetto, scaturiti dall'analisi dello stato dell'arte e infine una breve panoramica sulla base di partenza del progetto, descrivendo da cosa si è partiti, come è nata l'argomentazione che ha portato alla scelta del progetto e la modalità di svolgimento. Nel capitolo 2 parleremo del contesto di sviluppo, ovvero le tecnologie impiegate. Seguirà quindi una descrizione approfondita della scelta di certe tecnologie ma soprattutto del perché le si è scelte. Il capitolo 3 descriverà il generatore di traffico e configurazione di rete, descrivendone funzionalità, condizioni iniziali di setup di questa parte di applicazione e infine descrivendo come il tutto viene generato, passando dalla distribuzione spaziale dei nodi e creazione dei links all'ottenimento dei files sui quali sono memorizzati i dati ottenuti. Il capitolo 4 tratterà l'analizzatore di traffico, nello specifico dell'implementazione della logica che risiede dietro l'analisi del file contenente il traffico. Il capitolo 5 sarà sul visualizzatore grafico, in cui verrà fornita una panoramica sulle logiche dietro la creazione degli elementi grafici e delle animazioni, le modalità grafiche che è possibile ottenere, la descrizione delle scelte di design legate all'aspetto grafico e una sezione dedicata all'accessibilità, con cui si tratterà l'implementazione di soluzioni che trattano il tema del daltonismo. Il capitolo 6 darà un quadro generale sulla complessità computazionale delle sezioni di codice più sensibili, analizzando gli andamenti asintotici di tutte le principali parti. Infine avremo il capitolo 7, in cui tireremo le conclusioni del progetto, discutendo dei risultati finali e possibili impieghi futuri dell'applicazione.

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Ambito del tirocinio	1
1.2	Motivazioni	2
1.3	Stato dell'arte	2
1.4	Contributi	3
1.5	Base di partenza del progetto	4
2	Contesto di sviluppo: le tecnologie impiegate	5
2.1	Python	5
2.2	La libreria Manim	5
2.3	I formati Json e Yaml	6
3	Generatore di traffico e configurazione di rete	9
3.1	Funzionalità e setup	9
3.2	Esecuzione del generatore	17
3.3	Creazione dei links e nodi	19
3.4	Distribuzione dei nodi: aspect ratio	20
3.5	Generazione del traffico	21
3.6	Files prodotti	22
3.7	Aspetti realizzativi scartati: yaml flow e block style	25
4	Analizzatore di traffico	29
5	Visualizzatore grafico	33
5.1	Strutturazione e organizzazione del visualizzatore	33
5.2	Modalità grafiche e design	38
5.3	Accessibilità: modalità daltonismo	41
6	Prestazioni e complessità computazionale	43
6.1	Generatore di traffico	43
6.2	Analizzatore di traffico	48
6.3	Visualizzatore grafico	50
7	Conclusioni	55
	Ringraziamenti	59

Capitolo 1

Introduzione

Nel mondo le reti informatiche sono oramai un concetto ben istanziato nella collettività, la loro presenza è soverchiante e si dirama nei più disparati settori. Basti pensare già alle reti PAN (Personal Area Network) le quali connettono dispositivi personali entro pochi metri e che ognuno di noi usa abitualmente nella propria casa, alle reti LAN (Local Area Network), anch'esse presenti nelle nostre case così come in uffici o edifici scolastici, le reti dei data center fino a giungere alla rete globale internet, la quale è creatrice a sua volta di paradigmi come può essere l'internet of things. Le reti informatiche sono impiegate nei più vari settori come l'istruzione, in cui le reti sono cruciali nelle scuole e nelle università per avere accesso a risorse educative o sfruttare l'e-learning, i servizi pubblici governativi e sanitari, nel settore ludico e multimediale come il gioco online e l'attuale streaming di contenuti multimediali: insomma, le reti informatiche sono di fatto una presenza piena e diffusissima ed è estremamente difficile riuscire a immaginare il mondo come lo vediamo oggi senza questa tecnologia. Con l'aumentare delle funzionalità legate alle reti, così come i dispositivi collegati a esse, capire cosa succede al loro interno, come si muovono i dati, è quindi di cruciale importanza, tramite l'analisi dei dati che vi fruiscono è possibile fare diagnostica, per quanto riguarda un discorso di monitoraggio, ma è anche possibile applicare le analisi in un ambito didattico e accademico. Capire cosa sta succedendo in una rete in modo immediato e visivo è lo scopo di questo progetto, il quale punta a mostrare, in modo grafico, l'andamento del traffico di una rete.

1.1 Ambito del tirocinio

Il progetto fa parte del percorso di tirocinio interno intrapreso presso l'Università La Sapienza di Roma. L'argomento su cui verte il progetto è la realizzazione di un visualizzatore grafico dell'andamento del traffico di una rete di data center, basato su animazioni programmatiche. Il tool permette di visualizzare gli switch rappresentanti i vari endpoints e i link che li collegano i quali vengono colorati tramite animazioni nel tempo in base al traffico di rete precedentemente analizzato. Nel tool è presente anche una parte generativa di traffico di rete, una creazione di traffico fittizia di vitale importanza ai fini di testing. Il progetto è suddiviso quindi in tre parti; una parte che si occupa della generazione di una configurazione network e relativo traffico di rete, una parte che analizza il traffico di rete calcolandone le medie percentuali di

intervalli di tempo e aggiornate ripetutamente e infine una parte che visualizza il traffico analizzato dall'analizzatore producendo una rappresentazione video.

1.2 Motivazioni

L'idea di sviluppare un visualizzatore grafico di traffico di rete è nata, in sede di proposta, dal Professore Daniele De Sensi, relatore del tirocinio, e dalla mia volontà di sviluppare un'applicazione avente il front-end come focus dell'esperienza. Nel mio personale corso di studi presso il Dipartimento di Informatica non ho avuto modo di studiare e approfondire un discorso legato al front-end, per cui la volontà di intraprendere questo percorso nasce in primis da un forte interesse verso questo aspetto dell'informatica e in secondo luogo per un completamento di formazione professionale personale.

1.3 Stato dell'arte

L'esigenza di analisi di reti informatiche ha portato alla luce svariati tool che permettono appunto di analizzare cosa avviene in una rete, di studiarne i dati statistici e di visualizzare graficamente determinati scenari. L'università americana Johns Hopkins[10] ha stilato una lista di software per la visualizzazione e analisi di reti[11]:

- **Gephi[6]:** Gephi è il software leader di visualizzazione ed esplorazione per tutti i tipi di grafici e reti ed è open source. Le sue caratteristiche includono l'analisi esplorativa dei dati mediante manipolazioni di reti in tempo reale, analisi dei collegamenti per rivelare le strutture sottostanti delle associazioni tra oggetti, analisi dei social network per la creazione di connettori di dati sociali per mappare le organizzazioni della comunità e le reti di piccoli mondi, analisi della rete biologica per rappresentazione di modelli di dati biologici ed esportazione e creazione poster per promuovere e divulgare il lavoro scientifico con mappe stampabili di alta qualità.
- **Cytoscape[4]:** è una piattaforma software open source per visualizzare reti complesse e integrarle con qualsiasi tipo di dati. Consiste in una piattaforma per visualizzare reti di interazioni molecolari e percorsi biologici, potendo integrare queste reti con annotazioni, profili di espressione genica e altri dati. Originariamente progettato per la ricerca biologica, ora è una piattaforma generale per l'analisi e la visualizzazione di reti complesse.
- **GraphVis[7]:** è un software di visualizzazione di grafici open source. Caratteristiche, I programmi di layout Graphviz accettano descrizioni di grafici in un semplice linguaggio di testo e creano diagrammi in formati utili, come immagini e SVG per pagine web; PDF o Postscript per l'inclusione in altri documenti; o visualizzare in un browser grafico interattivo. Graphviz ha molte funzionalità utili per diagrammi concreti, come opzioni per colori, caratteri, layout di nodi tabulari, stili di linea, collegamenti ipertestuali e forme personalizzate.

- **igraph[8]**: è una collezione di librerie per creare, manipolare grafici e analizzare ponendo l'enfasi nell'efficienza, portabilità e facilità d'uso. Igraph è open source e gratuito e può essere programmato in R, Python, Mathematica e C/C++
- **UCINET6[23]**: è un pacchetto software per l'analisi dei dati dei social network. UCINET viene fornito con il tool di visualizzazione di rete NetDraw. Può leggere e scrivere una moltitudine di file di testo diversamente formattati, nonché file Excel. I metodi di analisi dei social network includono misure di centralità, identificazione di sottogruppi, analisi di ruolo, teoria dei grafi elementari e analisi statistica basata sulla permutazione. Inoltre, il pacchetto dispone di potenti routine di analisi delle matrici, come l'algebra delle matrici e la statistica multivariata.
- **SocNetV[20]**: è un'applicazione software gratuita multiplatforma per l'analisi e la visualizzazione dei social network. Tra le caratteristiche principali troviamo il poter disegnare i social network, caricare i campi da un file supportato (GraphML, GraphViz, Adjacency, EdgeList, GML, Pajek, UCINET, ecc.), personalizzare attori e collegamenti tramite sistema punta e clicca, analizzare le proprietà dei grafici e dei social network, produrre report HTML e incorporare layout di visualizzazione di rete
- **Pajek[12]**: è un software per la visualizzazione e l'analisi delle reti. La sua forza risiede nel poter analizzare reti complesse potendo arrivare fino a un miliardo di vertici. L'analisi e la visualizzazione vengono eseguite utilizzando sei tipi di dati: rete (grafico), partizione, vettore, cluster (sottoinsieme di vertici), permutazione (riordinamento dei vertici, proprietà ordinali); e gerarchia (struttura generale ad albero sui vertici).

1.4 Contributi

Da un punto di vista grafico e quindi di visualizzazione, la maggior parte degli strumenti sopra elencati, permette una certa forma di personalizzazione nella disposizione dei nodi, sia automaticamente attraverso algoritmi di layout sia manualmente, permettendo agli utenti di spostare i nodi per ottimizzare la visualizzazione o per enfatizzare certi aspetti della rete. Tuttavia, la possibilità di avere animazioni dinamiche che mostrino l'andamento del traffico nel tempo, mostrando la variazione del colore in base alla quantità dello stesso, risulta essere una caratteristica meno comune nei software di analisi di rete, nello specifico:

- Gephi: Non supporta nativamente animazioni dinamiche basate su traffico in tempo reale. Tuttavia, la sua flessibilità e la capacità di aggiungere plugin potrebbero permettere implementazioni personalizzate.
- Cytoscape: Anche se fortemente orientato all'analisi statica, plugin o estensioni potrebbero aggiungere capacità simili.
- GraphVis (Graphviz): Principalmente orientato verso la visualizzazione statica; non supporta direttamente animazioni dinamiche dei link basate sul traffico.

- **igraph**: Come libreria di analisi, non è orientato verso la visualizzazione in tempo reale o animazioni dei link basate su traffico nel suo utilizzo standard.
- **UCINET** (con **NetDraw**): Focalizzato sull'analisi statica di reti sociali; non supporta animazioni dinamiche in base al traffico.
- **SocNetV**: Orientato all'analisi statica e alla visualizzazione; non è progettato per visualizzare animazioni dinamiche basate sul traffico.
- **Pajek**: Simile agli altri, è più un tool per l'analisi statica e la visualizzazione di grandi reti, senza un supporto diretto per animazioni dei link basate su traffico.

In questo contesto, l'inserimento di una caratteristica che permetta di fare quanto premesso come base del progetto di tirocinio, risulta particolarmente indicata nel contribuire a fornire una soluzione visiva come strumento aggiuntivo di analisi di una rete, di debugging e anche come strumento didattico. La possibilità di avere un riscontro visivo istantaneo di cosa avviene nel tempo in una rete, a livello di traffico, può dare immediato feedback nel caso ci fosse un problema di congestione in un punto nevralgico, oppure mostrare parti di rete libere dove poter studiare un reindirizzamento dello stesso, volto a ottimizzare le prestazioni. A livello didattico ciò si potrebbe mostrare per presentazioni così come per didattica tramite banalmente spiegazioni. Insomma i benefici derivanti da una rappresentazione del generale sono evidenti e ciò può essere di grosso aiuto nell'analisi così anche solo come semplice rappresentazione del traffico di rete, nonchè uno strumento complementare a quanto già presente in circolazione.

1.5 Base di partenza del progetto

Il progetto è partito da zero, si basa sullo sviluppo totalmente nuovo dell'applicazione ed è stato tutto idealizzato e pianificato in sede di proposta. Come approfondirò in seguito, nella sezione dedicata alla tecnologia impiegata, il progetto non è l'unica cosa a essere partita da zero, poichè il linguaggio scelto per sviluppare l'applicazione è Python[18], linguaggio non incluso nel mio personale percorso di studi e che ho dovuto necessariamente studiare da zero per poter affrontare il percorso di tirocinio. Il lavoro è stato svolto individualmente.

Capitolo 2

Contesto di sviluppo: le tecnologie impiegate

Il progetto, a livello di tecnologia impiegata, pone le fondamenta su tre aspetti che andremo a elencare di seguito, descrivendo le varie motivazioni che hanno spinto a sceglierli.

2.1 Python

Uno dei primi aspetti di cui si è tenuto conto è stata la scelta del linguaggio di programmazione che, come accennato precedentemente, è Python. Ci sono diversi validi motivi per cui puntare su questa tecnologia; in primis è materia di insegnamento alla facoltà di Informatica de La Sapienza, ciò ha quindi una forte valenza accademica, in secondo luogo risulta essere il linguaggio più usato al mondo, ad affermarlo è l' Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)[9][1] un'associazione internazionale di scienziati professionisti con l'obiettivo della promozione delle scienze tecnologiche. Il linguaggio ha molte caratteristiche ottime, come una sintassi semplice e leggibile che lo rende facile da imparare e semplice da usare per gli sviluppatori esperti accorciando di gran lunga i tempi di sviluppo, una grande versatilità per poter essere usato in ambiti diversi come l'intelligenza artificiale, il web development, data analysis e molto altro, un ampio supporto delle librerie, due delle quali usate proprio nel progetto (di cui ne parlerò a breve), una grande comunità in cui trovare facilmente risorse, tutorial e supporto, una interoperabilità che permette un'ottima integrazione con altre tecnologie e altri linguaggi, orientato agli oggetti volto a facilitare la gestione del codice e migliora il riuso, scalabile e di facile integrazione.

2.2 La libreria Manim

Il secondo aspetto risiede nella scelta della libreria Manim[21], che viene definita come "Animation engine for explanatory math videos". Lo scopo di Manim è quindi quello di animare concetti tecnici legati alla matematica e si affida alla semplicità di Python per generare animazioni in modo programmatico. Manim può produrre anche immagini e gif, ma è nella produzione di video che splende, in questo modo è possibile progettare animazioni e renderle visibili in movimento, coprendo figure

algebriche, grafici cartesiani, grafi e molto altro[21]. La libreria offre molta libertà sui risultati che si vogliono ottenere, può renderizzare singole immagini, gif e da molte opzioni per quanto riguarda l'output video, fornendo la possibilità di renderizzarli nei formati più comuni con la possibilità di personalizzazione del framerate:

- 480p (SD): 854 x 480
- 720p (HD): 1280 x 720
- 1080p (HD): 1920 x 1080
- 1440p (2K): 2560 x 1440
- 2160p (4K): 3840 x 2160

Manim viene impiegato principalmente per presentazioni che implicino aspetti matematici, la sfida del progetto è stata quella di cercare di sfruttare le potenzialità della libreria e renderle al servizio di uno strumento di analisi sul traffico di reti, una sfida vinta come potremo vedere in seguito. Il terzo aspetto tecnologico riguarda l'aspetto di gestione dei dati. Un visualizzatore grafico di traffico di reti ha bisogno principalmente di due insiemi di informazioni importanti; uno riguarda tutte le informazioni che riguardano il come è costruita la rete, parliamo quindi degli endpoint quali sono gli switch e conseguenti informazioni annesse, pensiamo ad esempio all'indirizzo di rete, un nome identificativo e così via, ma parliamo anche dei link che collegano i vari endpoint, con la necessità di tenere traccia delle loro capacità trasmissive, la tipologia di rete, se ha una struttura a grafo completo, mesh, torus o disposizione libera e molte altre informazioni che discuteremo in seguito.

2.3 I formati Json e Yaml

L'altro insieme di informazioni deriva dal traffico vero e proprio, rendendo quindi necessario un sistema di mantenimento dei dati legati ai pacchetti trasmessi. L'analisi di questi due insiemi di informazioni ha portato alla valutazione di tre sistemi per la strutturazione di dati; json[13], yaml[25] e csv[19]. Dopo attenta analisi si è deciso di adottare il formato json per strutturare e memorizzare i dati legati al traffico, con la possibilità di scegliere anche il formato yaml, mentre per i dati relativi alla descrizione della rete il compito è stato affidato esclusivamente a yaml, csv è stato scartato. Perché csv è stato scartato? Sebbene csv rappresenti una valida alternativa tenendo conto di aspetti prestazionali, essendo un formato molto veloce da analizzare, da leggere e scrivere, tuttavia lo diventa meno quando c'è bisogno di strutturare maggiormente i dati con strutture più complesse della semplice forma tabellare, tipicamente usate nei database. L'idea di scartarla, sia per strutturare i dati della rete che per quelli del traffico, deriva principalmente dai seguenti motivi:

- **Leggibilità:** uno dei primi intenti del progetto era di rendere l'applicazione il più leggibile possibile, questo perché si è fortemente voluto attribuirne anche scopi di debugging e didattici, laddove avere una certa leggibilità è più che ragionevole.

- **Strutture complesse:** sicuramente il motivo più importante. Con csv non è possibile rappresentare strutture complesse, parliamo ad esempio di oggetti all'interno di altri oggetti. Sebbene per come sia ora strutturato il progetto una rappresentazione cvs è ancora possibile, ciò potrebbe non esserlo in futuro nell'ottica di espansione del progetto

Per esplicitare meglio il concetto di struttura complessa non fattibile è possibile focalizzarsi sul seguente esempio. Segue la rappresentazione di un pacchetto di rete così come viene utilizzato nel progetto, in questo caso una lista contenente un solo elemento:

```
[
  {
    "A": 1,
    "B": 2,
    "t": "2024-03-22 12:30:00",
    "d": 1518
  }
]
```

Codice 2.1. pacchetto di rete rappresentato in json

Dove A e B sono gli endpoints interessati, t è il timestamp di creazione pacchetto e d la dimensione del payload in bytes(). In csv questa struttura è rappresentabile come segue:

```
A,B,t,d
2,1,2024-03-22 12:30:00,1518
2,1,2024-03-22 12:30:00,1518
```

Codice 2.2. pacchetti di rete rappresentati in csv

Tuttavia se si dovesse rendere questa struttura più complessa, avremmo problemi a realizzarla in csv, basterebbe l'aggiunta di un campo che a sua volta necessita di informazione strutturata, come ad esempio inserire le informazione dell'header:

```
[
  {
    "A": 1,
    "B": 2,
    "t": "2024-03-22 12:30:00",
    "d": 4000,
    "ip_header": {
      "version": 4,
      "ihl": 5,
      "type_of_service": 0,
      "total_length": 300,
      "identification": 98765,
      "flags": {
        "reserved_bit": false,
        "dont_fragment": true,
        "more_fragments": false
      },
      "fragment_offset": 0,
      "time_to_live": 64,
      "protocol": 6,
      "header_checksum": "2B5A",
      "source_address": "192.168.1.1",
      "destination_address": "192.168.1.2"
    }
  }
]
```

Codice 2.3. pacchetto di rete maggiormente strutturate in json

In questa struttura abbiamo ben due oggetti nidificati, ip header e flags. Questo tipo di struttura è difficilmente replicabile in csv che si presta maggiormente per strutture piatte mentre json e yaml permettono molta più libertà di strutturazione. La scelta del formato json per rappresentare i dati del traffico di rete è quindi legata alla possibilità di espandere la rappresentazione con strutture più complesse in ottica di espansioni future del progetto, ma è indubbiamente legata alle prestazioni che questo formato riesce a dare. Json è un formato ampiamente supportato e la sua semplicità permette di ottenere risultati ottimi per le operazioni di parsing, lettura e scrittura per strutture aventi grandi quantità di dati. Sebbene l'applicazione supporti sia json che yaml per quanto riguarda il memorizzare i dati legati al traffico, la scelta preferenziale ricade su json. Questo perché, nonostante json produca files di dimensioni maggiori rispetto a yaml, la schiacciante velocità di elaborazione di json rende la creazione di un file di dimensioni maggiore ampiamente giustificabile, considerando soprattutto la natura del progetto in cui non vi è una criticità d'uso nella dimensione dei files. Come vedremo in seguito, i test eseguiti sui tempi di lettura e scrittura rispettivamente della stessa struttura ricreata sia in json che in yaml, sapranno ben dimostrare quanto appena affermato. Per impiegare questi formati sono state usate rispettivamente la libreria json [17], appartenente alla libreria standard di Python, e la libreria esterna PyYAML [2], un parser ed emitter di yaml per Python. Infine giungiamo ai motivi per cui si è scelto invece esclusivamente yaml per rappresentare i dati relativi alle informazioni che descrivono la rete. Le motivazioni consistono sempre nella volontà di garantire un formato che si presti a espansioni future e quindi che possano richiedere strutturazioni complesse, ma soprattutto, in questo caso specifico, nell'alta leggibilità che yaml offre. Generalmente i dati che servono a descrivere una rete non sono mai paragonabili a quelli necessari per registrare tutto il traffico, si voleva dare quindi uno strumento molto chiaro da leggere per fare in modo che la configurazione di rete fosse sempre molto chiara, intuitiva e di facile accesso, sia in scrittura che in lettura. Per dare una stima di grandezza, il file di configurazione network che produce il generatore di pacchetti, basato su 50 switch collegati come un grafo mesh pesa appena 9 KB. Seguirà la descrizione approfondita del progetto, principalmente suddiviso in tre parti; la prima parte riguarda la generazione di traffico di rete fittizio, la seconda è l'analizzatore dei dati di configurazione di rete e relativo traffico mentre la terza parte riguarda il visualizzatore grafico vero e proprio.

Capitolo 3

Generatore di traffico e configurazione di rete

Il progetto è composto da tre anime, una di esse è un generatore di traffico di rete e relativa configurazione. Lo scopo del generatore è da ricercare principalmente in motivazioni di testing, ma può essere usato anche in ambito didattico per scopi esemplificativi. Con esso è stato possibile testare l'analizzatore e conseguentemente il visualizzatore grafico, nonchè si è creato uno strumento esemplificativo di determinati funzionamenti collegati al traffico di rete. La configurazione di rete consiste nella produzione di una struttura dati che descriva le caratteristiche della rete, la quale verrà memorizzata in un file dal nome "network" e avente estensione yaml, mentre per quanto riguarda il traffico, crea una struttura che consiste in una lista di pacchetti e memorizzata in un file denominato "packets".

3.1 Funzionalità e setup

Lo script permette di eseguire quanto descritto mettendo a disposizione due modalità, auto e user. Entrambe le modalità produrranno due files, network.yaml conterà le caratteristiche della rete e il file packets.json (o packets.yaml a seconda della scelta) conterrà il traffico vero e proprio di tutti i pacchetti generati dalla simulazione. La modalità auto chiede all'utente il numero di switch, la capacità dei link e la tipologia del grafo con il quale rappresentare la rete (completo, mesh, torus) e imposterà in modo del tutto automatico la disposizione degli switch in base alla scelta del grafo effettuata. Per poter operare, in entrambe le modalità, lo script ha bisogno di leggere il file sim_setup.yaml, il quale contiene le informazioni necessarie per la configurazione. Il file di setup è impostato come segue:

```
averageDelta: 1000
updateDelta: 100
creationDelta: 100
startSimTime: 2024-03-22 12:30:00
simTime: 5
packetSize: 4000
colorblind: "no"
dotsSize: "fixed"
trafficVariation: random
packetsFile: json
```

Codice 3.1. esempio di setup file

Andremo ora a spiegare il significato dietro ogni voce:

- **averageDelta:** rappresenta l'intervallo temporale in millisecondi delle medie percentuali di traffico da calcolare nell'analizzatore di traffico.
- **updateDelta:** rappresenta ogni quanti millisecondi debbano essere aggiornate le medie averageDelta nell'analizzatore
- **creationDelta:** rappresenta ogni quanti millisecondi debbano essere creati i pacchetti nel generatore
- **startSimTime:** è il datetime dell'inizio della generazione nel formato YY:MM:DD HH:MM:SS, inoltre è possibile specificare anche un eventuale tempo avente millisecondi da specificare come ad esempio 12:30:00.500
- **simTime:** è la durata della simulazione in secondi
- **packetSize:** è la dimensione in bytes di un pacchetto, i pacchetti nella simulazione avranno questa dimensione
- **colorblind:** è una stringa "yes" o "no" che abilita, se posta su "yes", una visualizzazione compatibile per persone daltoniche di cui parleremo successivamente quando discuteremo della parte relativa al visualizzatore grafico.
- **trafficVariation:** è la variazione di traffico per secondo che si desidera impostare; può essere il valore "random" oppure uno dei seguenti [5, 10, 20, 25, 50] e di conseguenza determinerà la variazione percentuale di traffico che avviene ogni secondo di simulazione. Il valore "random" sceglie casualmente una percentuale ogni secondo con un valore che va da 0 a 100
- **packetsFile:** specifica quale tecnologia si vuole utilizzare per il file packets, si può scegliere tra json e yaml

La generazione di pacchetti è calcolata sulla base della capacità dei link fornita e su un valore casuale di percentuale di traffico che varia ogni secondo, per esempio avendo 6 links su 3 secondi di simulazione e il parametro "trafficVariation" settato a random potremmo avere delle assegnazioni di percentuali di traffico come le seguenti:

```
endpoints: [1, 2], sim second: 0, trafficPerc: 65
endpoints: [1, 3], sim second: 0, trafficPerc: 9
endpoints: [2, 4], sim second: 0, trafficPerc: 23
endpoints: [2, 5], sim second: 0, trafficPerc: 67
endpoints: [3, 6], sim second: 0, trafficPerc: 7
endpoints: [3, 7], sim second: 0, trafficPerc: 87
endpoints: [1, 2], sim second: 1, trafficPerc: 86
endpoints: [1, 3], sim second: 1, trafficPerc: 26
endpoints: [2, 4], sim second: 1, trafficPerc: 13
endpoints: [2, 5], sim second: 1, trafficPerc: 13
endpoints: [3, 6], sim second: 1, trafficPerc: 39
endpoints: [3, 7], sim second: 1, trafficPerc: 65
endpoints: [1, 2], sim second: 2, trafficPerc: 31
endpoints: [1, 3], sim second: 2, trafficPerc: 54
endpoints: [2, 4], sim second: 2, trafficPerc: 11
endpoints: [2, 5], sim second: 2, trafficPerc: 20
endpoints: [3, 6], sim second: 2, trafficPerc: 17
endpoints: [3, 7], sim second: 2, trafficPerc: 46
```

Codice 3.2. esempio di variazione traffico casuale

Una volta lanciato il generatore avremo le seguenti possibilità di scelte:

- **auto:** la modalità automatica, provvederà a disporre i nodi (switch) di rete in modo del tutto automatico. Dopo aver scelto la modalità auto si dovranno inserire i seguenti parametri via prompt:
 - numero di switch
 - capacità dei link
 - tipologia della rappresentazione grafica della rete (grafo completo, mesh, torus)
- **user:** una modalità in cui l'utente può personalizzare la configurazione di rete

La modalità user necessita di un file "custom_graph.yaml" con i parametri necessari a descrivere la rete del quale si vuole analizzare il traffico. Con questa modalità l'utente ha completa libertà nel personalizzare la rete ed è tenuto quindi a descriverne ogni suo aspetto. Il custom_graph.yaml prevede la struttura di un dizionario in cui a ogni chiave corrisponde un valore, mostriamo un esempio con possibili varianti che elencheremo:

```
---
data:
  graphType: mesh
  coordinates:
    - [1, 0, 2, 0]
    - [3, 0, 4, 5]
    - [6, 7, 8, 9]
  switches:
    1:
      ip: "123.123.123.0"
      switchName: Anthem
    2:
      ip: "123.123.123.1"
      switchName: Beta
    3:
      ip: "123.123.123.2"
      switchName: Cyber
    4:
      ip: "123.123.123.3"
      switchName: Dafne
    5:
      ip: "123.123.123.4"
      switchName: Eclipse
    6:
      ip: "123.123.123.5"
      switchName: Fox
    7:
      ip: "123.123.123.6"
      switchName: Gea
    8:
      ip: "123.123.123.7"
      switchName: H20
    9:
      ip: "123.123.123.8"
      switchName: Italy
  links:
    - { linkCap: 10, endpoints: [1, 3] }
    - { linkCap: 100, endpoints: [1, 6] }
    - { linkCap: 10, endpoints: [3, 6] }
    - { linkCap: 10, endpoints: [4, 8] }
```

```

- { linkCap: 10, endpoints: [5, 9] }
- { linkCap: 100, endpoints: [3, 5] }
- { linkCap: 10, endpoints: [6, 9] }
- { linkCap: 100, endpoints: [4, 5] }
- { linkCap: 10, endpoints: [6, 7] }
- { linkCap: 10, endpoints: [7, 8] }
- { linkCap: 100, endpoints: [8, 9] }
- { linkCap: 10, endpoints: [2, 4] }
- { linkCap: 10, endpoints: [2, 8] }
phases:
  2024-01-01 00:00:01: "phase1"
  2024-01-01 00:00:02: "phase2"

```

Codice 3.3. esempio di custom file per la configurazione

Descriviamo i vari parametri:

- **graphType:** identifica la tipologia del grafo da rappresentare, sono disponibili tre opzioni:
 - **mesh:** l'algoritmo individua in modo automatico gli archi (i link) che collegano i nodi (gli switch) adiacenti tra loro presenti nella matrice coordinates
 - **torus:** esegue lo stessa procedura usate per mesh e in addizione collega tra loro i nodi che si trovano alle estremità della matrice
 - **graph:** è la modalità più libera, collega gli switch tramite i link forniti dall'utente, indipendentemente da dove vengano collocati
- **coordinates:** rappresenta le coordinate dei vari switch, i quali vanno rappresentati con un id numerico che va da 1 a 1000. C'è una precisa motivazione di design per questa scelta ed è legata a una rappresentazione grafica ottimale del visualizzatore grafico. Gli zeri invece rappresentano uno spazio vuoto in cui non è presente uno switch.
- **links:** rappresenta i link della rete i quali possono essere specificati con i campi:
 - **linkCap:** esprime la capacità del link in Mbps
 - **endpoints:** esprime gli endpoints collegati al link
- **phases:** rappresenta le fasi temporali che accompagnano la durata dell'attività di rete, sono identificate tramite timestamp che ha come valore la descrizione della fase che parte dal timestamp stesso.

Il lettore avrà notato che per il campo graphType manca la possibilità di scegliere un grafo completo. In realtà la possibilità c'è e risiede semplicemente nell'opzione "graph", essendo la modalità libera, l'utente può tranquillamente descrivere un grafo completo in questo modo avendo chiaramente l'accortezza di posizionare i nodi in modo tale che i link si sovrappongano. Tuttavia ciò è solo valido per quanto riguarda il generatore, se l'utente dovesse fornire un file network.yaml, che descriva un grafo completo, da fornire direttamente come input per l'analizzatore di traffico, può farlo tranquillamente, in quel caso avrà ben due modi per farlo: scegliere il graphType come "complete" per avere una disposizione circolare dei nodi

e lasciando il campo "coordinates" vuoto, oppure come "graph" ma specificando le coordinate. Torneremo sull'argomento nel capitolo dedicato al visualizzatore grafico. Come si può notare dalla figura 3.4, gli switch sono identificati tramite un valore numerico, questa è una precisa scelta di design e mira a mantenere il concetto di leggibilità sempre presente. In questo caso la scelta deriva dal semplificare e rendere immediatamente chiaro il campo coordinates (rappresentato da una matrice quadrata), così che l'occhio possa identificare immediatamente la rappresentazione della disposizione. Questa leggibilità è ottenuta grazie al formato yaml, il quale minimizza i caratteri da scrivere. Così facendo si rende intuitivo il posizionamento degli switch nello spazio, inoltre è una caratteristica importante per quanto riguarda il visualizzatore grafico, poichè rappresentando i nodi con un valore numerico che va da 1 a 1000 (spiegheremo il perchè di questa scelta a breve), è possibile rappresentare su schermo una grande quantità di elementi per far sì che possano essere visualizzati contemporaneamente e rimanere leggibili ma soprattutto, distinguibili. Uno dei problemi maggiormente riscontrati nelle applicazioni discusse nella sezione Stato dell'arte 1.3 è che, le varie soluzioni impiegate per la rappresentazione dei nodi, risultano essere confusionarie per via di una sovrapposizione massiva di link che collegano i nodi, mentre uno degli scopi del progetto è di rendere altamente leggibile l'interpretazione del traffico di rete ed è per questo che si è posta una particolare attenzione in termini di sovrapposizione degli elementi, spaziatura adeguata, scelta dei colori giusti e altri aspetti che approfondiremo nella sezione apposita riguardante la parte di visualizzazione grafica. Qualora la capacità dei link sia uguale per tutti è possibile inserire il campo linkCap per poter così evitare di avere lo stesso valore nei vari link rappresentati nel campo links, potendo rappresentare solo gli endpoints:

```
data:
  graphType: torus
  coordinates:
    - [1, 0, 2, 0]
    - [3, 0, 4, 5]
    - [6, 7, 8, 9]
  linkCap: 10
  switches:
    1:
      ip: "123.123.123.0"
      switchName: A
    2:
      ip: "123.123.123.1"
      switchName: B
    3:
      ip: "123.123.123.2"
      switchName: C
    4:
      ip: "123.123.123.3"
      switchName: D
    5:
      ip: "123.123.123.4"
      switchName: E
    6:
      ip: "123.123.123.5"
      switchName: F
    7:
      ip: "123.123.123.6"
      switchName: G
    8:
      ip: "123.123.123.7"
      switchName: H
```

```

9:
  ip: "123.123.123.8"
  switchName: I
links:
  - [1, 3]
  - [1, 6]
  - [3, 6]
  - [4, 8]
  - [5, 9]
  - [3, 5]
  - [6, 9]
  - [4, 5]
  - [6, 7]
  - [7, 8]
  - [8, 9]
  - [2, 4]
  - [2, 8]
phases:
  2024-01-01 00:00:01: "phase1"
  2024-01-01 00:00:02: "phase2"

```

Codice 3.4. esempio di custom file con capacità uguali a tutti i link

Un'altra possibilità è quella di lasciare che il programma ricavi in automatico i link, in questo caso basterà specificare solo linkCap che sarà uguale per tutti i link:

```

---
data:
  graphType: mesh
  coordinates:
    - [1, 2, 3]
    - [4, 5, 6]
    - [7, 8, 9]
  linkCap: 10
  switches:
    1:
      ip: "123.123.123.0"
      switchName: Anthem
    2:
      ip: "123.123.123.1"
      switchName: Beta
    3:
      ip: "123.123.123.2"
      switchName: Cyber
    4:
      ip: "123.123.123.3"
      switchName: Dafne
    5:
      ip: "123.123.123.4"
      switchName: Eclipse
    6:
      ip: "123.123.123.5"
      switchName: Fox
    7:
      ip: "123.123.123.6"
      switchName: Gea
    8:
      ip: "123.123.123.7"
      switchName: H2O
    9:
      ip: "123.123.123.8"
      switchName: Italy
  phases:
    2024-01-01 00:00:01: "phase1"
    2024-01-01 00:00:02: "phase2"

```

Codice 3.5. esempio di custom graph file con link di eguale capacità

Come si può notare, questo tipo di approccio concede una certa libertà di azione, dando la possibilità di prestarsi anche a soluzioni ibride di grafi canonici. Possiamo avere un esempio di quanto descritto nell'opzione torus. Il tipo di grafo torus generalmente è associato ad un grafo in cui ogni nodo ha quattro nodi adiacenti come mostrato in figura:

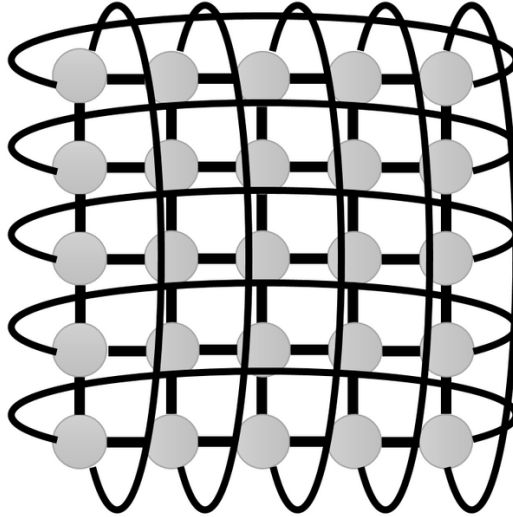


Figura 3.1. esempio di torus graph [24]

Tuttavia, le opzioni messe a disposizione dall'applicazione permettono una certa libertà di movimento, per esempio avendo una configurazione come quella riportata in figura 3.4, una volta analizzati i dati tramite l'analizzatore e forniti come input al visualizzatore, potremmo ottenere un risultato in cui i nodi nella matrice che abbiano un valore pari a zero, non vengano collegati:

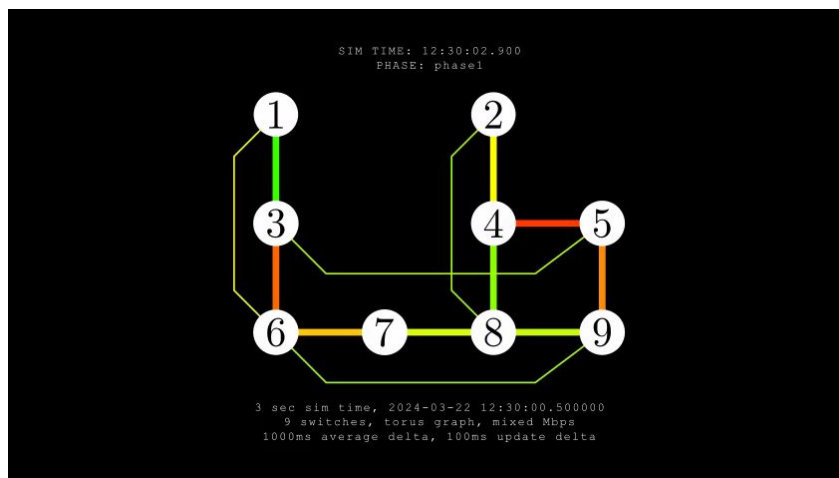


Figura 3.2. risultato grafico del visualizzatore per un custom graph file

L'ultima possibilità di personalizzazione consiste nel poter personalizzare la matrice coordinates come si preferisce, seguendo sempre la regola che laddove c'è un valore numerico, esso sarà un nodo, mentre laddove ci sarà uno zero verrà inteso come spazio vuoto. Quindi se si vuole rappresentare un grafico che non sia di tipo mesh o torus, bisogna specificare nel campo graphType il valore "graph", mostriamo un esempio:

```
---
data:
  graphType: graph
  coordinates:
    - [0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0]
    - [0, 0, 2, 0, 0, 0, 3, 0, 0]
    - [0, 4, 0, 5, 0, 6, 0, 7, 0]
  linkCap: 10
  switches:
    1:
      ip: "123.123.123.0"
      switchName: A
    2:
      ip: "123.123.123.1"
      switchName: B
    3:
      ip: "123.123.123.2"
      switchName: C
    4:
      ip: "123.123.123.3"
      switchName: D
    5:
      ip: "123.123.123.4"
      switchName: E
    6:
      ip: "123.123.123.5"
      switchName: F
    7:
      ip: "123.123.123.6"
      switchName: G
  links:
    - [1, 2]
    - [1, 3]
    - [2, 4]
    - [2, 5]
    - [3, 6]
    - [3, 7]
  phases:
    2024-01-01 00:00:01: "phase1"
    2024-01-01 00:00:02: "phase2"
```

Codice 3.6. esempio di custom graph file, graphType posto al valore graph

Come possiamo intuire osservando i valori nel campo coordinates, l'esempio ricrea la struttura di un albero, i links sono appunto specificati nel campo link e una volta generato il traffico con il generatore, analizzato e dato come input al visualizzatore otteniamo un risultato come in figura 3.3.

Vien da sè che si ottiene così una certa libertà di espressione bidimensionale, con la quale l'utente può scegliere la rappresentazione che più si addice alla rete che si vuole realizzare.



Figura 3.3. risultato grafico del visualizzatore per un custom graph file in modalità "graph"

3.2 Esecuzione del generatore

Il generatore può essere pensato come suddiviso in sezioni logiche per quanto riguarda la stesura del codice nello script; la prima riguarda la fase di interazione con l'utente, il codice strutturato in una serie di richieste per l'utente e controlli sul corretto inserimento dei dati, successivamente vi è la parte di caricamento del file contenente i parametri di rete 3.1, segue la creazione dei links, la generazione del traffico creando tutti i pacchetti, si creano le informazioni inerenti agli switch e il tutto viene memorizzato sui files. Vedremo più in dettaglio questi aspetti, a livello di codice, nel capitolo dedicato allo studio della complessità computazionale e prestazioni, mentre in questo capitolo ci focalizzeremo sulla descrizione su come viene generato il tutto. Descriveremo ora il funzionamento dell'esecuzione vera e propria dello script relativo alla generazione del traffico e dei files che produrrà. All'avvio l'utente sarà chiamato a scegliere tra due modalità, come accennato precedentemente, auto e user; scegliendo auto verrà chiesto all'utente di scegliere il numero di switch che si vuole attribuire alla rete, da un minimo di due a un massimo di mille. Questo intervallo numerico nasce per poter rappresentare una rete in un generico data center, il quale generalmente ospita fino a un migliaio di switch. Ciò non toglie che, in un ottica futura di espansione del software, questo range non possa essere espanso con le dovute modifiche. Successivamente alla scelta nel numero di switch l'utente sarà chiamato a scegliere la tipologia di rete potendo scegliere tra i valori "c" (completo), "m" (mesh) e "t" (torus). Per grafo completo si intende quando un nodo è collegato a tutti i nodi rimanenti, è il grafo computazionalmente parlando più oneroso da ricreare per via della grande crescita del numero di archi da rappresentare al crescere dei nodi. Avendo infatti n nodi avremo un numero di link l pari a:

$$l = \frac{n(n-1)}{2} \quad (3.1)$$

Ogni nodo è collegato a tutti gli altri meno se stesso, $n(n-1)$, e si divide per due perchè gli archi non vanno contati due volte. Si parla quindi di una crescita esponenziale al variare del numero di nodi. Per grafo mesh si è inteso una rappresentazione

in cui ogni nodo ha quattro nodi adiacenti, fatta eccezione di coloro che risiedono alle estremità, come raffigurato nell'esempio in figura creato dal visualizzatore 3.4. Nel caso della scelta di un grafico torus, il visualizzatore provvederà a disegnare

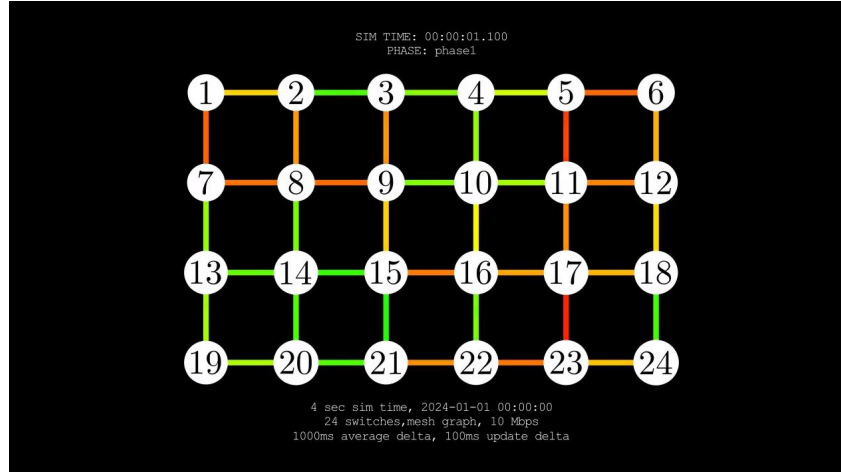


Figura 3.4. risultato grafico del visualizzatore per un auto mesh graph

la struttura come mostrata in figura 3.1. La scelta successiva in cui l'utente sarà invitato a fornire, riguarda la capacità che si vuole associare ai link appartenenti alla rete, potendo scegliere tra i valori 10, 100 e 1000 e vengono intese come grandezze espresse in megabytes (MB). Una volta inseriti questi parametri il generatore provvederà a creare la configurazione di rete e il rispettivo traffico, memorizzando i dati rispettivamente nei files `network.yaml` e `packets.json/yaml`. Scegliendo la modalità user non viene richiesto alcun dato via prompt, questo perchè, come descritto in precedenza, tutti i dati di cui ha bisogno il generatore devono essere presenti nel file `custom_graph.yaml` 3.4. Un diagramma che illustra le fasi e le scelte cui è possibile fare è rappresentato in figura 3.5.

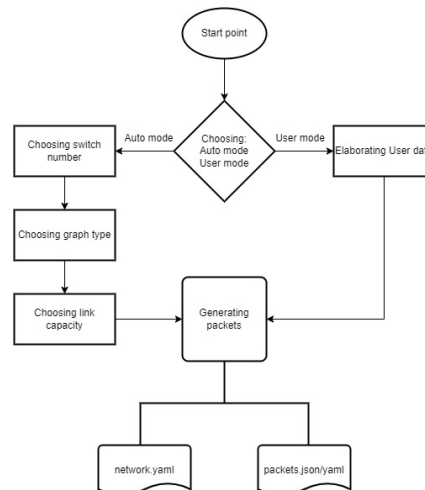


Figura 3.5. diagramma di flusso di esecuzione del generatore

Il generatore si serve di una serie di funzioni di utilità per creare le strutture

in base alle scelte dell'utente. Tutte le tipologie di rappresentazioni avvengono seguendo una logica di distribuzione dei nodi in forma matriciale, fatta eccezione della tipologia di grafo completo (spiegheremo nella parte dedicata al visualizzatore il perchè), come descritto in dettaglio nel prossimo paragrafo.

3.3 Creazione dei links e nodi

Dopo aver effettuato le scelte via prompt e dopo che il programma ha caricato i parametri dal file `sim_setup.yaml` avviene la creazione dei link e dei nodi. Per i link viene creata una struttura che consiste in un dizionario in cui ogni chiave sarà associata ai parametri del link con un identificativo come chiave:

```
{
  "endpoints": sorted((switch_a, switch_b)),
  "capacity": link_cap,
  "trafficPerc": 0
}
```

Codice 3.7. esempio di rappresentazione di un link

Il campo `endpoints` rappresenta i nodi che il link collega, `capacity` è la capacità del link e `trafficPerc` è la percentuale di traffico del link. Le percentuali di traffico del link sono pensate per variare ogni secondo di generazione e servono solo ai fini della creazione della quantità di traffico, questo specifico campo non sarà riportato nel `network.yaml` poichè è un dato che non servirà più, di fatti la struttura che rappresenta i link verrà memorizzata come una lista di dizionari come segue:

```
- capacity: 10
  endpoints:
    - 1
    - 2
- capacity: 10
  endpoints:
    - 2
    - 3
- capacity: 10
  endpoints:
    - 1
    - 4
- capacity: 10
  endpoints:
    - 4
    - 5
```

Codice 3.8. esempio di struttura finale dei links

Il campo `capacity` identifica la capacità del link espressa in MB, mentre `endpoints` è una lista di due identificatori numerici compresi tra 2 e 1000 che rappresentano i nodi che li collega. Ci sono diverse configurazioni che lo script sarà tenuto a considerare in base alle scelte dell'utente, possiamo individuarle in:

- **Modalità auto:** ci sono 3 configurazioni possibili, complete graph, mesh e torus.
 - **Complete graph:** i links vengono in modo tale che ogni nodo sia collegato a tutti i nodi rimanenti. Non c'è un riferimento esplicito al

posizionamento poichè, come vedremo successivamente, sarà compito del visualizzatore grafico disporre i nodi nello spazio.

- **Mesh graph:** i links vengono creati in modo tale che ogni nodo abbia 4 nodi adiacenti rispetto a una distribuzione spaziale su matrice rettangolare, a eccezione dei nodi che risiedono alle estremità.
- **Torus graph:** i links vengono creati in modo da replicare il più possibile la struttura di un torus graph completo, come mostrato in fig. 3.1 utilizzando lo stesso sistema di disposizione usato per il mesh graph basato su matrice rettangolare. Qualora il numero di nodi scelto non riesca a riempire la matrice, l'algoritmo non creerà i link di nodi che non risultino essere alle estremità.
- **Modalità user:** i links vengono semplicemente caricati dal file e copiati nella struttura. Nel caso in cui i link non siano specificati nel custom file allora vengono generati.

In questa fase i nodi (ovvero gli endpoints) sono definiti tramite il campo *enpoints* dei vari links, solo successivamente verrà aggiunto l'indirizzo di ciascun endpoint, un suo nome e l'ID. Nel caso di modalità auto vengono creati indirizzi automaticamente a partire da 10.0.0.1, l'identificativo è un valore numerico crescente a partire da 1 e il nome è semplicemente la composizione della parola *switch* seguita dall' ID, come ad esempio *switch1*. Nel caso di modalità user tutte le informazioni inerenti agli switch saranno copiate nella struttura così come sono memorizzate nel file `custom_graph.yaml`

3.4 Distribuzione dei nodi: aspect ratio

Come accennato precedentemente, la distribuzione dei nodi è pensata per essere disegnata in forma matriciale, questo segue una precisa scelta di design e riguarda l'aspect ratio adottato per disegnare al meglio gli elementi su schermo tramite la libreria Manim, la quale produce video in 16:9, quindi è sorta l'esigenza di sfruttare al massimo questo formato visivo per poter inserire nel modo più coerente e ottimizzato possibile i vari elementi della rete. La soluzione adottata è stata quella di pensare al numero di nodi come un'area di un quadrato (matrice quadrata) e successivamente trovare l'area equivalente di un rettangolo (matrice rettangolare) considerando un aspect ratio di 16:9. Consideriamo il numero di nodi A come l'area del quadrato e con n un suo lato $n = \sqrt{A}$. Denotiamo con l la lunghezza e con h l'altezza del rettangolo. La condizione di proporzione si può esprimere come

$$\frac{l}{h} = \frac{16}{9}.$$

Dato che l'area del rettangolo deve essere uguale a quella del quadrato, abbiamo che

$$l \cdot h = n^2.$$

Utilizzando la proporzione, possiamo esprimere l in termini di h come

$$l = \frac{16}{9}h.$$

Sostituendo questa espressione nell'equazione dell'area, otteniamo

$$\frac{16}{9}h \cdot h = n^2,$$

che si semplifica in

$$\frac{16}{9}h^2 = n^2.$$

Da qui, isoliamo h ottenendo

$$h^2 = \frac{9}{16}n^2 \implies h = n \cdot \frac{3}{4}.$$

Risostituendo il valore di h nell'espressione di l , abbiamo

$$l = \frac{16}{9} \cdot n \cdot \frac{3}{4} = n \cdot \frac{4}{3}.$$

Abbiamo ottenuto la base l , corrispondente al numero di colonne della matrice, e l'altezza h , corrispondente al numero di righe, del rettangolo in 16:9. Tuttavia c'è l'esigenza di rappresentare numeri interi poichè la radice dell'area A può non essere un numero intero e di conseguenza anche l e h . Per ovviare al problema si è deciso di arrotondare l e h all'intero superiore, così facendo, qualora si avesse il lato s avente parte decimale, sarà sempre verificato:

$$(l + 1)(h + 1) > lh \tag{3.2}$$

riuscendo a contenere l'area e rimanendo in proporzione.

3.5 Generazione del traffico

Successivamente alla creazione dei link e dei nodi vi è la generazione del traffico, ovvero la creazione di tutti i pacchetti che vengono creati. Descriveremo ora il criterio di creazione del traffico; l'idea è quella di iterare su frazioni di tempo cui l'unità temporale è definita dal campo `creationDelta` (tutti i campi che citeremo provengono dal file `setup sim_setup.yaml`). L'algoritmo cicla per ogni frazione di tempo per la durata della generazione, definita nel campo `simTime` e per ciascuna calcola un quantitativo di pacchetti, proporzionale alla percentuale di traffico, per ogni link presente nella rete. Ogni secondo trascorso viene cambiata la percentuale di traffico di ogni link secondo la scelta fatta nel campo `trafficVariation`. Nei grafici nelle figure 3.6, 3.7 possiamo vedere due esempi di andamento di variazione di traffico percentuale. Il tempo, data e ora, che definisce quando è cominciata la trasmissione lo ritroviamo nel timestamp `startSimTime`. Poichè per ogni frazione il calcolo dei pacchetti può non essere preciso, ovvero può capitare che ci sia un numero con una parte decimale, l'algoritmo provvede a recuperare questa rimanenza, tramutarla in pacchetto e aggiungerla. Questo fa sì di avere un'elevata approssimazione, tendente al 100% per quanto riguarda l'essere più fedeli possibili alle percentuali di traffico da generare.

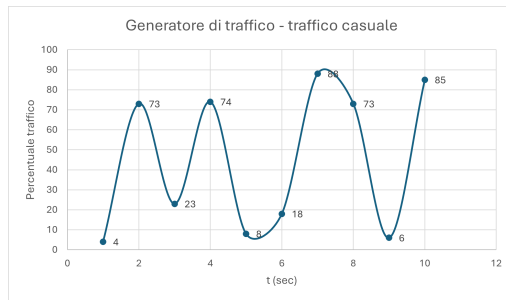


Figura 3.6. esempio, variazione di traffico percentuale casuale per 10 secondi

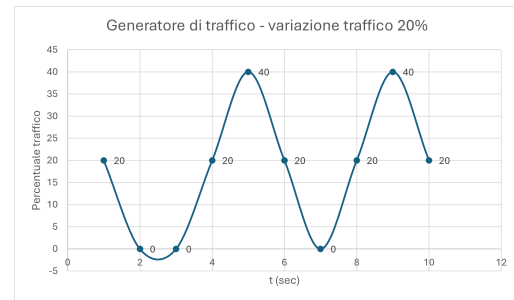


Figura 3.7. esempio, variazione di traffico percentuale fissato per 10 secondi

3.6 Files prodotti

Una volta creati links e nodi, generato il traffico, costruito le strutture del traffico e della rete, lo script provvederà a salvare il risultato nei files descritti precedentemente. Un esempio di file network lo ritroviamo in figura 3.9.

```
- - capacity: 10
  endpoints:
  - 1
  - 2
- capacity: 10
  endpoints:
  - 1
  - 3
- capacity: 10
  endpoints:
  - 3
  - 4
- capacity: 10
  endpoints:
  - 2
  - 4
- - address: 10.0.0.1
  switchID: 1
  switchName: switch1
- address: 10.0.0.2
  switchID: 2
  switchName: switch2
- address: 10.0.0.3
  switchID: 3
  switchName: switch3
- address: 10.0.0.4
  switchID: 4
  switchName: switch4
- averageDelta: 1000
  colorblind: 'no'
  dotsSize: fixed
  graphType: mesh
  linkCap: 10
  packetsFile: json
  simTime: 5
  startSimTime: 2024-03-22 12:30:00
  updateDelta: 100
- coordinates:
  - - 1
    - 2
  - - 3
    - 4
- 2024-03-22 12:30:01: phase1
```

Codice 3.9. esempio di network file

Il file è una lista contenente tutti i valori relativi alla configurazione network, avendo i seguenti campi nell'ordine:

- Una lista di links ognuno dei quali descrive la capacità e gli endpoints al quale è collegato
- Una lista di switch ognuno dei quali descrive l'indirizzo, il proprio identificativo e un eventuale nome associato
- Un oggetto rappresentante un dizionario con i parametri di rete:
 - averageDelta: l'intervallo di tempo delle medie percentuali di traffico da calcolare con l'analizzatore espressi in millisecondi
 - colorblind: yes/no, abilita nel caso di scelta "yes" una palette cromatica nel visualizzatore grafico adatta a persone affette da daltonismo
 - dotSize: fixed/adaptive, un'opzione che rende uguale la dimensione a tutti gli elementi raffiguranti gli switch nel visualizzatore grafico (fixed), oppure che adatta la dimensione alla lunghezza dell'identificativo degli switch (adaptive)
 - graphType: la tipologia del grafo da visualizzare (complete, mesh, torus)
 - linkCap: valore compreso tra [10, 100, 1000]/mixed, un valore che identifica la capacità dei links qualora fossero tutti della stessa grandezza, mixed altrimenti
 - packetsFile: json/yaml, la scelta del formato con il quale si vuole memorizzare il traffico di rete
 - simTime: la durata complessiva delle operazioni di rete
 - startSimTime: timestamp, data e ora nel formato YY:MM:DD HH:MM:SS dell'inizio della trasmissione del traffico
 - updateDelta: un intervallo temporale che identifica ogni quanto la media averageDelta debba essere aggiornata
- Una lista di liste che descrive la matrice del posizionamento degli switch. Nel caso di scelta di grafo completo questo campo è una lista vuota ([])
- Una lista di fasi temporali che descrivono specifici intervalli temporali nel formato "YY:MM:DD HH:MM:SS = descrizione fase"

Il generatore crea delle fasi descrittive ogni 10 secondi di simulazione e le memorizza come ultimo valore della lista della struttura network. Per il file packets abbiamo invece due possibili risultati in base alla scelta fatta nel file di setup 3.1, ovvero json e yaml. Il generatore crea i pacchetti secondo l'assunzione in cui essi vengano registrati in ordine di invio, avremo quindi una struttura corrispondente a una lista di pacchetti ordinati per timestamp di invio. Le strutture si presentano come in figura 3.10 per il formato json e in figura 3.11 per il formato yaml. Come vedremo nel

prossimo capitolo, questi due files rappresentano l'esatto formato che riesce a leggere l'analizzatore, quindi un utente che voglia usare l'analizzatore e il visualizzatore grafico dovrà formattare accuratamente i suoi dati come descritto.

```
[
  {
    "A": 1,
    "B": 2,
    "t": "2024-03-22 12:30:00",
    "d": 4000
  },
  {
    "A": 2,
    "B": 1,
    "t": "2024-03-22 12:30:00",
    "d": 4000
  },
  {
    "A": 2,
    "B": 1,
    "t": "2024-03-22 12:30:00",
    "d": 4000
  }
]
```

Codice 3.10. esempio di packets file in formato json

```
- A: 1
  B: 2
  d: 4000
  t: &id001 2024-03-22 12:30:00
- A: 1
  B: 2
  d: 4000
  t: *id001
- A: 1
  B: 2
  d: 4000
  t: *id001
```

Codice 3.11. esempio di packets file in formato yaml

In cui in entrambi i casi abbiamo i seguenti campi:

- A: l'endpoint di partenza del pacchetto
- B: l'endpoint di arrivo del pacchetto
- d: la dimensione del payload del pacchetto espresso in Bytes
- t: il timestamp rappresentante la data e l'ora di invio del pacchetto

La scelta di usare un solo carattere per descrivere i vari campi può sembrare in contrasto con la volontà di rendere leggibile il tutto, ma c'è una valida motivazione dietro. Il risparmio di caratteri, in files che sono potenzialmente molto grandi, è un aspetto cruciale sia per quanto riguarda l'occupazione di memoria, sia per motivi di efficienza. Consideriamo una rappresentazione di un pacchetto più descrittivo come in figura 3.13:

```
{
  "endpointA": 1,
```



```

"endpointB": 2,
"timestamp": "2024-03-22 12:30:00",
"dimension": 1518
}

```

Codice 3.12. rappresentazione di un pacchetto con descrizione completa

Avremmo così 37 bytes necessari per i nomi dei campi contro i 4 per la rappresentazione di un pacchetto descritta precedentemente, avendo uno scarto di 33 bytes per pacchetto. Questa quantità, moltiplicata la grande quantità di pacchetti da rappresentare, può pesare non poco. Indipendentemente dal numero di bytes necessari a rappresentare un pacchetto in forma minimale, possiamo fare una stima di quanto sarebbe più grande un file packets avendo descrizioni di nomi più lunghi; supponiamo di avere un grafo completo costituito da 5 switch collegati tra loro con switch aventi capienza 1 Gbps (gigabit), il numero dei link, per l'equazione in fig. 3.1, risulta essere pari a 10. Supponiamo che tutta la rete stia trasmettendo al 50% della sua capacità trasmissiva per tutta la durata dell'attività di rete. Considerando una dimensione d di payload pari a 1518 Bytes uguale per tutti i pacchetti trasmessi, definiamo come pps i pacchetti al secondo, da cui, per un link in un dato secondo avremo:

$$\begin{aligned}
 1 \text{ Gbps} &= 10^9 \text{ bit} \\
 1 \text{ GBps} &= \frac{10^9}{8} = 125,000,000 \text{ bytes} & (1 \text{ byte} = 8 \text{ bit}) \\
 50\% \text{ capacity} &= \frac{125,000,000}{2} = 65,500,000 \text{ bytes} \\
 d &= 1518 \text{ bytes} \\
 pps &= \frac{65,500,000 \text{ bytes}}{d} \approx 41172.59 \\
 \text{bytes di differenza} &= 41172.59 \times 33 \approx 1.35 \text{ MBytes}
 \end{aligned}$$

Ciò significa che per ogni secondo di traffico avremmo $1.35 \text{ MB} \times 10 \text{ links} = 13.5 \text{ MB}$ in più, in 100 secondi di traffico avremmo 1350 Mbytes, cioè 1.35 GBytes in più per una rete avente soltanto 10 links, quindi con la scelta di rendere mono carattere le descrizioni si ha un notevole risparmio in termini di data storage. Chiaramente in ottica di espansione futura del progetto, avendo strutture più complesse per i pacchetti, potrebbe essere necessario avere elementi maggiormente descrittivi, tuttavia ciò non toglie che una certa cura nella scelta di una descrizione minimale non possa essere comunque adottata in via preferenziale.

3.7 Aspetti realizzativi scartati: yaml flow e block style

Un approccio inizialmente realizzato e poi scartato, è stato quello di poter dare la possibilità di scegliere la modalità di salvataggio del file packets.yaml. La libreria PyYAML permette di salvare un file yaml secondo due modalità; la prima è definita block style e l'altra flow style. Di default, PyYAML sceglie lo stile di una collection a seconda che abbia a sua volta collection nidificate. Qualora ci fossero collection nidificate verrà assegnato lo stile block, il quale è il formato come lo abbiamo già

visto in figura 3.11, altrimenti verrà assegnato lo stile flow che corrisponde al codice in figura.

```
[{A: 2, B: 1, d: 4000, t: &id001 !!timestamp '2024-03-22 12:30:00'}, {A: 1, B: 2, d: 4000, t: *id001}, {A: 1, B: 2, d: 4000, t: *id001}, {A: 2, B: 1, d: 4000, t: *id001}, {A: 2, B: 1, d: 3752, t: *id001}, {A: 1, B: 2, d: 4000, t: &id002 !!timestamp '2024-03-22 12:30:00.100000'}, {A: 2, B: 1, d: 4000, t: *id002}, {A: 1, B: 2, d: 4000, t: *id002}, {A: 1, B: 2, d: 4000, t: *id002}, {A: 2, B: 1, d: 4000, t: *id002}, {A: 2, B: 1, d: 3752, t: *id002}, {A: 1, B: 2, d: 4000, t: &id003 !!timestamp '2024-03-22 12:30:00.200000'}, {A: 2, B: 1, d: 4000, t: *id003}, {A: 2, B: 1, d: 4000, t: *id003}, {A: 1, B: 2, d: 4000, t: *id003},
```

Codice 3.13. *rappresentazione di un pacchetto con descrizione completa*

Inizialmente si era provato a dare la possibilità di scegliere, tramite file `sim_setup`, tra il formato block e flow poichè in fase di test si è visto che l'opzione flow riduce ulteriormente la dimensione del file `packets.yaml`. Tuttavia i test hanno dimostrato che le differenze delle grandezze dei files e i tempi necessari a realizzarli non erano così diversi tra loro, quindi si è deciso di scartare del tutto l'opzione. Possiamo vedere il risultato del test sulle dimensioni dei files in figura 3.8, dove troviamo sull'asse delle ascisse il numero di switch per test, mentre sull'asse delle ordinate abbiamo la variabile che esprime i megabytes, questo perchè essa è la variabile dipendente, ovvero i megabytes dipendono dal numero di switch che viene scelto. Il grafico relativo ai tempi di scrittura/lettura lo troviamo in figura 3.9, in questo caso abbiamo sull'asse delle ascisse sempre il numero di switch per test, mentre sull'asse delle ordinate il tempo (in secondi) necessario per le scritture e letture, poichè il tempo di computazione dipende dal numero di switch scelto. Possiamo notare dai grafici che il risparmio di bytes è di circa 4 MB per il test effettuato su 10 switch, mentre i tempi di esecuzione, sia di scrittura che di lettura, sono praticamente sovrapponibili, infatti l'operazione di scrittura per block e flow style è identico, mentre lievemente più performante è il block style in lettura.

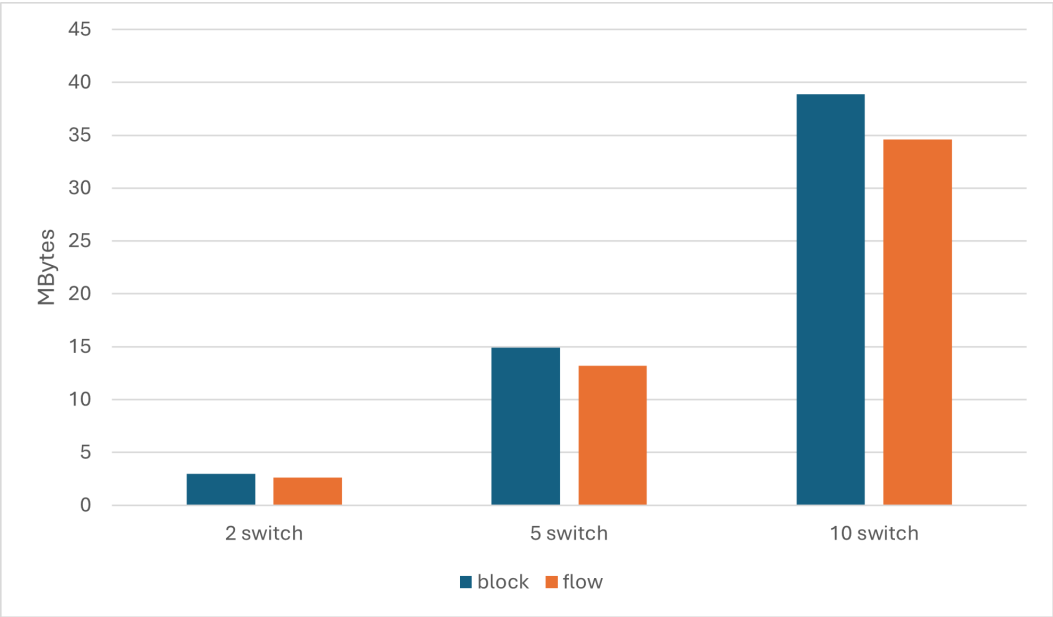


Figura 3.8. test yaml block/flow style, dimensione files

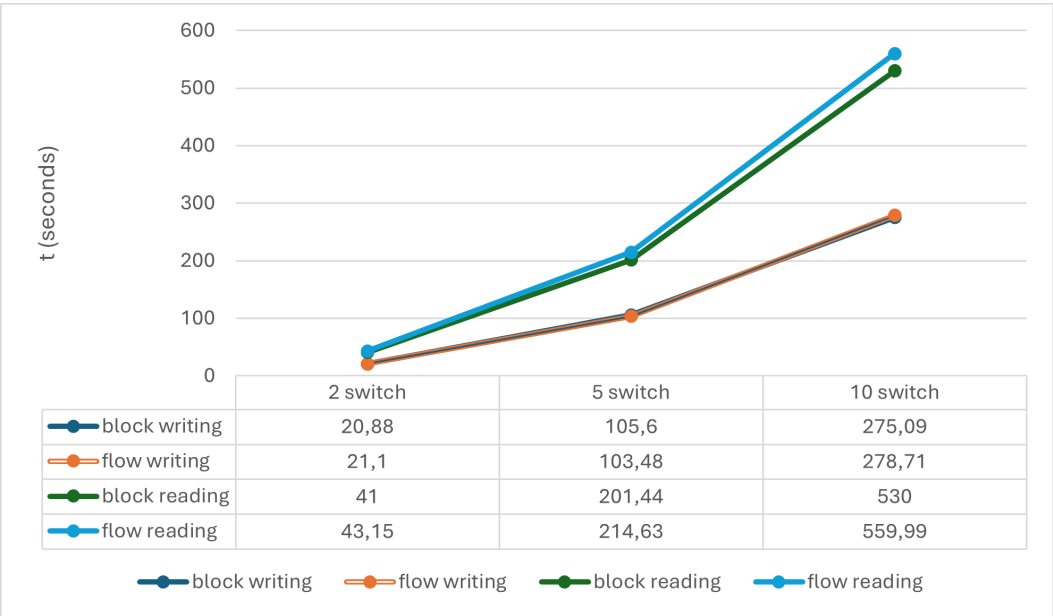


Figura 3.9. test yaml block/flow style, tempi di scrittura e lettura

Capitolo 4

Analizzatore di traffico

L'analizzatore di traffico è la seconda anima del progetto essendo la parte che analizza il traffico calcolando le medie percentuali e che produce un file, `analyzed_data.yaml`, che conterrà sia le informazioni di rete come links, switches e parametri di rete, sia le registrazioni del traffico percentuale di ogni link. Per poter operare, l'analizzatore ha bisogno dei due files, `network.yaml` e `packets.yaml`, creati dal generatore o che siano creati e formattati dall'utente. Abbiamo descritto in dettaglio la composizione dei files nella sezione 3.6. L'esecuzione dello script parte in primo luogo caricando i files richiesti e creando le strutture necessarie al calcolo delle medie, dopodichè avviene il calcolo vero e proprio, viene creata la struttura che servirà come input del visualizzatore grafico e infine viene creato il file `analyzed_data.yaml` con tale struttura. Poichè per motivi di efficienza si è scelto di strutturare i link come una lista nel file `network.yaml` e non come dizionario (in cui ogni link avrebbe avuto un identificativo come chiave), si è presentato il problema dell'identificazione dei link. I link in fin dei conti possono essere identificati dai propri endpoints (il grafo viene inteso in modo tale che ci sia un unico link tra due endpoints), ovvero una coppia di nodi, nel nostro caso, una coppia di switch. Tuttavia la sfida che si è presentata è rappresentata dal fatto che se è vero quindi che un link è identificato da due endpoints, a e b , è vero anche che in questo caso l'ordinamento degli endpoints non deve essere rilevante. Abbiamo infatti pacchetti che vengono inviati sia da a per poi arrivare a b , sia da b verso a . Questo è un problema poichè stiamo cercando di identificare un link ma abbiamo due coppie, (a, b) e (b, a) che si sono ugualmente valide ma rappresentano anche due coppie distinte, il che contrasta con il concetto di identificatore. L'ideale sarebbe usare il tipo `set`, ovvero il concetto di insieme come collezione non ordinata in cui due insiemi $\{b, b\}$, $\{b, a\}$ sono considerati uguali in termini di contenuto. Sembrerebbe un problema risolto, ma non è così, il perchè risiede nel fatto che i `set` in Python sono mutabili: il contenuto può essere modificato utilizzando metodi come `add()` e `remove()`. Poiché `set` è mutabile, non ha valore hash [16] e non può essere utilizzato come chiave del dizionario [14]. Il tipo di dato che fa al caso nostro è quindi il `frozenset`, un `set` che è immutabile e hashable, quindi utilizzabile come chiave di un dizionario. Nell'analizzatore l'identificazione dei link è molto importante, perchè nel momento in cui si va a scorrere la lista di tutti i pacchetti registrati, vi è il bisogno di identificare il link per potergli attribuire le varie medie da calcolare. Viene quindi creata una struttura ausiliaria in cui la lista

di link presente nel file `network.yaml` viene tramutata in un dizionario avente come chiavi dei frozenset con gli endpoints e, come valori associati, una serie di variabili atte a mantenere le somme dei pacchetti che man mano verranno scanditi. Segue la scansione dei pacchetti in cui, per ogni unità frazionaria di tempo dettata dal campo `updateDelta` presente in `network.yaml`, vengono sommati tutti i bytes di tutti i pacchetti e attribuiti ai link corrispettivi. Una volta finita la scansione, la struttura ausiliaria viene scandita per ricavare le medie percentuali delle varie somme calcolate dal passaggio precedente e viene creata la struttura che verrà memorizzata in `analyzed_data.yaml`. La struttura memorizzata è raffigurata in figura 4.2.

```
{
  - averageDelta: 1000
  simStartTime: 2024-03-22 12:30:00
  simTime: 2
  updateDelta: 100
  - - endpoints:
    - 1
    - 2
    traffic:
    - 59.0
    - 53.5
    - 48.0
    - 42.5
    - 37.0
    - 31.5
    - 26.0
    - 20.5
    - 15.0
    - 9.5
    - 4.0
  - endpoints:
    - 1
    - 3
    traffic:
    - 33.0
    - 38.8
    - 44.6
    - 50.4
    - 56.2
    - 62.0
    - 67.8
    - 73.6
    - 79.4
    - 85.2
    - 91.0
}
```

Codice 4.1. rappresentazione della struttura `analyzed_data`

La struttura consiste in una lista di due elementi, il primo è un dizionario rappresentate i parametri di rete necessari al visualizzatore grafico, il secondo è una lista di dizionari rappresentati i link, definiti dal campo endpoints, e le loro medie percentuali memorizzate nel campo traffic. L'unico campo che non abbiamo ancora incontrato finora è traffic, esso rappresenta le medie percentuali di tempo averageDelta, calcolate ogni updateDelta millisecondi. Nell'esempio in figura 4.2 abbiamo che le medie vengono calcolate quindi in intervalli di 1000 ms (millisecondi), aggiornati ogni 100 ms. Prendiamo ad esempio il primo link identificato dalla coppia di endpoints (1, 2), i suoi valori del campo traffic sono associati ai seguenti tempi:

```
2024-03-22 12:30:01 - 59
2024-03-22 12:30:01.100000 - 53,5
2024-03-22 12:30:01.200000 - 48
2024-03-22 12:30:01.300000 - 42,5
2024-03-22 12:30:01.400000 - 37
2024-03-22 12:30:01.500000 - 31,5
2024-03-22 12:30:01.600000 - 26
2024-03-22 12:30:01.700000 - 20,5
2024-03-22 12:30:01.800000 - 15
2024-03-22 12:30:01.900000 - 9,5
2024-03-22 12:30:02 - 4
```

Codice 4.2. timestamps e medie percentuali calcolate dall'analizzatore

I timestamps sono espressi nel formato YY:MM:DD HH:MM:SS.Microseconds, questo per via dell'impiego dell'oggetto `timedelta` [15] che converte un millisecondo in 1000 microsecondi e con cui è possibile effettuare operazioni aritmetiche di somma e differenza tra due oggetti `datetime` [15]. Il primo valore che abbiamo, 59, è quindi la media percentuale dei pacchetti inviati tra il tempo 12:30:00 e 12:30:01, il secondo valore, 53.3 è la media dell'intervallo 12:30:00.100000 e 12:30:01.100000, e così via. Il file prodotto `analyzed_data.yaml` sarà l'input necessario per il visualizzatore grafico, che verrà discusso nel capitolo successivo.

Capitolo 5

Visualizzatore grafico

La terza anima del progetto è il visualizzatore grafico sviluppato tramite l'ausilio della libreria Manim. Andremo a descrivere il funzionamento dello script, come è strutturato e organizzato, in seguito descriveremo le modalità grafiche dei grafi che sono possibili ottenere, inclusa la rappresentazione video delle informazioni relative ai switch e link. Seguirà una sezione sulle scelte di design servite a curare l'aspetto visivo e infine ci sarà spazio per l'accessibilità inclusa nel progetto che prevede un'opzione per daltonici e che consente quindi di cambiare i colori che rappresentano il traffico.

5.1 Strutturazione e organizzazione del visualizzatore

Andremo ora a descrivere come è strutturato il codice a livello logico. La prima cosa che salta all'occhio aprendo il progetto potrebbe essere la riga di codice:

```
from manim import *
```

Potrebbe sembrare un errore, o una scelta pigra per velocizzare le importazioni delle sezioni di libreria necessaria, ma in realtà questo è proprio l'uso raccomandato dalla documentazione ufficiale di utilizzare Manim [22]. Una volta avviato lo script verranno caricati i files `analyzed_data.yaml` e `network.yaml`, successivamente verranno impostati i colori del traffico in base alla scelta fatta nel campo `colorblind` all'interno del file `network`, dopodichè possiamo pensare al resto dello script come un bivio in cui ci sono le due funzioni principali; la funzione che renderizzerà il grafo in caso di grafo completo e la funzione che renderizzerà un grafo pensato per essere disposto tramite matrice. La funzione relativa al grafo completo sfrutta la potenza di Manim per la disposizione dei nodi e degli archi (links), provvedendo una disposizione automatica ed organica degli elementi e rappresenta la scelta più indicata per questo tipo di rappresentazione; per farlo bisogna settare il campo `customGraph` nel file `network` al valore "complete" e lasciare il campo "coordinates" vuoto. Per ottenere un grafo completo con coordinate personalizzate bisognerà assegnare a `graphType` il valore "graph" e specificare le coordinate nel campo "coordinates". Vedremo degli esempi in figura nel paragrafo successivo. Entrambe le funzioni hanno lo stesso pattern di creazione del grafico e di creazione delle animazioni; prima si costruiscono le strutture da visualizzare, inclusi i parametri di rete da

visualizzare, successivamente viene eseguito una iterazione sui timestamps ricavati dal file `analyzed_data` in cui per ogni intervallo di tempo `updateTime` viene presa la percentuale corrispondente di ciascun link, si prendono i colori associati alle varie percentuali e si crea un'animazione di durata 1 secondo di transizione verso il colore scelto e si ripete fino a quando non si arriva a fine `simTime`. Per dare una maggiore idea sul come vengono create le forme e le animazioni in Manim faremo una breve introduzione alla libreria. In Manim ogni oggetto viene definito `Mobject`, ovvero un "Mathematical Object", e deriva dalla classe di base `Mobject`, cioè un oggetto che può essere visualizzato a schermo, per esempio una forma rettangolo, una linea o un cerchio, vengono definiti tutti `mobject`. La classe `Scene` è la tela sul quale si disegnano i `mobjects`, una volta istanziati essi vanno aggiunti alla `Scene` per poter essere visualizzati, ciò è possibile tramite il metodo `add()`. Prendiamo il primo esempio fornito dalla documentazione Manim:

```
{
    from manim import *

    class CreatingMobjects(Scene):
        def construct(self):
            circle = Circle()
            self.add(circle)
            self.wait(1)
            self.remove(circle)
}
```

Codice 5.1. un primo esempio di utilizzo di Manim [22]

Come descrive la documentazione ufficiale, generalmente tutto il codice che descrive un video va all'interno del metodo `construct()` della classe `Scene`, per poter visualizzare un `mobject` si chiama il metodo `add()` della `Scene` contenuta, in questo caso passiamo un `mobject` `circle` come parametro, aggiungendolo alla `Scene`. Il metodo `wait(1)` fa passare un secondo di tempo e `remove(circle)` lo rimuove. Si intuisce da subito le potenzialità che offre la libreria ma sono le animazioni il cuore di Manim. Ogni proprietà di un `mobject` che può essere modificata, può essere animata. Infatti ogni metodo che cambia una proprietà di un `mobject` può essere usato come un'animazione tramite l'uso di `animate()`.

```
{
    from manim import *

    class AnimateExample(Scene):
        def construct(self):
            square = Square().set_fill(RED, opacity=1.0)
            self.add(square)

            # animate the change of color
            self.play(square.animate.set_fill(WHITE))
            self.wait(1)

            # animate the change of position and the rotation
            self.play(square.animate.shift(UP).rotate(PI / 3))
            self.wait(1)
}
```

Codice 5.2. un primo esempio di animazioni in Manim [22]

Nel codice in fig. 5.2, vediamo come impostare il colore rosso e il livello di opacità al `mobject` `Square()`, applicando poi il metodo `square.animate.set_fill(WHITE)`

viene creata l'animazione di transizione di colore da rosso a bianco. L'animazione creata deve essere aggiunta alla `Scene` per poterla visualizzare e lo si fa tramite `play()`. Questa breve introduzione a Manim ci dà già l'idea della potenza che offre ponendo come unico limite la creatività dello sviluppatore. Ritornando alla descrizione delle funzioni principali, il grafo completo, della funzione dedicata, viene creato tramite la classe `Graph()`, in cui due dei principali parametri richiesti sono una lista di valori che identificano i nomi dei nodi e una lista di coppie (tuple) che descrivono gli archi (link). Chiaramente la liste degli switch e delle tuple di endpoints vengono create a monte. Per quanto riguarda la creazione delle animazioni, il cuore risiede in questo pseudocodice:

```
animations.append(grafo.edges[(A, B)].animate.set_color(traffic_color))
```

Codice 5.3. creazione animazione traffico

In questo pseudocodice abbiamo una lista di animazioni `animations`, in cui aggiungiamo un'animazione `animate` che interessa l'oggetto arco restituito da `grafo.edges[(A, B)]` e individuato dalla coppia di endpoints (A, B). Dopodichè definiamo quale proprietà deve essere animata, in questo caso l'impostazione di un nuovo colore tramite `set_color()` il quale è il colore corrispondente al timestamp correntemente analizzato. Questa operazione viene effettuata per tutti i link per l'intervallo di tempo `updateDelta`, quando tutte le animazioni sono settate si usa il metodo `play(animation*)` per animarle tutte contemporaneamente e ciò si ripete per la durata di tempo registrato.

Per quanto riguarda la seconda funzione principale, il pattern di creazione è analogo, tuttavia è interessante descrivere il posizionamento dei nodi.

```
for row in range(rows):
    for col in range(cols):
        opacity = 1
        # Switches with ID=0 are considered as empty spaces
        if str(mesh[row][col]) == EMPTY_SPACE:
            opacity = 0
        dot = None
        if network_data[CONST.NETWORK["SIM_PARAMS"]]["dotsSize"]=="adaptive":
            dot = LabeledDot(str(mesh[row][col]),
                            point=np.array([col * spacing, row*-spacing, 0]))
        elif network_data[CONST.NETWORK["SIM_PARAMS"]]["dotsSize"]=="fixed":
            dot = LabeledDot(str(mesh[row][col]),
                            radius=0.6,
                            point=np.array([col*spacing, row*-spacing, 0]))
        dot.set_opacity(opacity)
        graph_mesh[mesh[row][col]] = dot
        mesh_grid.add(dot)
```

Codice 5.4. creazione posizionamento nodi griglia

Il codice in figura 5.4 mostra come vengono creati e disposti i nodi in una griglia. Vengono considerati tutti i valori rappresentanti i nodi (switch) presenti nel campo `coordinates` del file `network.yaml`, anche quelli aventi valori zero, i quali vengono comunque aggiunti ma settati con opacità pari a zero i quali non verranno renderizzati nel risultato finale, quindi non peseranno in termini computazionali, e fungono da riferimento per i valori adiacenti al pari dei valori diversi da zero. I nodi sono rappresentati da `mobject LabeledDot()`, ovvero dei cerchi pieni con raffigurato al loro interno il valore dell'ID dello switch. Al momento di creazione,

nel `LabeledDot()`, viene passato anche un array rappresentante le coordinate $[x, y, z]$ che il nodo dovrà avere. Tutti i nodi vengono aggiunti singolarmente in un mobject `VGroup()` (variabile `mesh_grid`), ovvero un gruppo che può contenere oggetti vettorializzati. Per quanto riguarda invece la creazione dei links, la parte che rappresenta il mesh graph è creata tramite mobjects `Line()`, i quali rappresentano rette che congiungono due punti, avremo così i link definiti come segue:

```
line = Line(dot_a.get_center(),
            dot_b.get_center(),
            color=START_COLOR,
            stroke_width=8)
```

Codice 5.5. creazione link

Il mobject prende le coordinate dei nodi da collegare come paramtri, oltre al colore di partenza e alla dimesione. Nel caso di grafo torus si aggiunge il controllo dei nodi posti all'estremità della griglia; qui vi è un controllo preciso circa la tipologia di posizionamento poichè se nell'analizzatore di traffico avevamo il problema di rappresentare in un unico modo due tuple con ordinamento diverso, in questo caso l'ordinamento è molto importante per poter disegnare gli archi dei nodi alle estremità, questo perchè i link che le collegano devono essere disegnati manualmente creando più segmenti concatenati. Il lettore si starà chiedendo se non esistesse un mobject come `Line()` per rappresentare dei link arcati, e in effetti uno c'è ed è `ArcbetweenPoints()`, il quale funzionamento è esattamente cme `Line()`. Il problema che è sorto in fase di sviluppo è che, per ridimensionare i grafi quando diventano più grandi dell'area di visualizzazione, si è reso neccessario del metodo `auto_zoom()` della classe `MovingCameraScene`, ovvero la scena utilizzata nel progetto che permette cambiamenti di visuale della camera. Il ridimensionamento generato automaticamente dal metodo va in conflitto con `ArcsBetweenPoints()`, creando artifici grafici non desiderati, per cui si è reso necessario questo altrimenti utilissimo mobject. Si è quindi passati a una realizzazione manuale degli archi che segue la creazione di 3 segmenti concatenati per rappresentare i link del torus dei nodi posti alle estremità. Particolare attenzione va data al metodo `get_center()` del mobject `LabeledDot()`, poichè il metodo ritorna le coordinate del nodo, ci servirà per descrivere come vengono creati i link manuali. L'idea di creazione deriva dal considerare il centro dei nodi delle estremità come punti di origine di piani cartesiani x, y dai quali ricavare le coordinate dei 3 segmenti, i vari sistemi di coordinate sono;

- **Links verticali:**

- prima linea: si parte da un nodo posto all'estremità superiore della griglia ottenendo le coordinate con `get_center()` e ne definiamo il punto *pointA*, si prende il punto $p1 = (-x, -y)$, rispetto alle coordinate di *pointA*, e si crea la linea che parte da p1 a pointA
- seconda linea: si prende il nodo posto all'estremità inferiore della griglia nella stessa colonna in cui è presente *pointA*, e ricavandone le coordinate con il metodo abbiamo un punto che definiamo come *pointB*, si prende il punto $p2 = (-x, y)$, rispetto alle coordinate di *pointB*, e si crea la linea che parte da p2 a pointB
- terza linea: si crea una linea che va dal punto p1 al punto p2.

- **Links orizzontali:**

- prima linea: si parte da un nodo posto all'estremità sinistra della griglia ottenendo le coordinate con `get_center()` e ne definiamo il punto *pointA*, si prende il punto $p1 = (x, -y)$, rispetto alle coordinate di *pointA*, e si crea la linea che parte da p1 a pointA
- seconda linea: si prende il nodo posto all'estremità destra della griglia nella stessa riga in cui è presente *pointA*, e ricavandone le coordinate con il metodo abbiamo un punto che definiamo come *pointB*, si prende il punto $p2 = (-x, -y)$, rispetto alle coordinate di *pointB*, e si crea la linea che parte da p2 a pointB
- terza linea: si crea una linea che va dal punto p1 al punto p2.

Vien da sè che in questo caso è indispensabile l'ordinamento, poichè per ogni specifico nodo ci sono delle specifiche coordinate per la creazione dei link manuali. Se non si facesse questo tipo di controllo, potremmo avere una situazione come in figura 5.1, avremmo una situazione molto disorganica e asimmetrica.

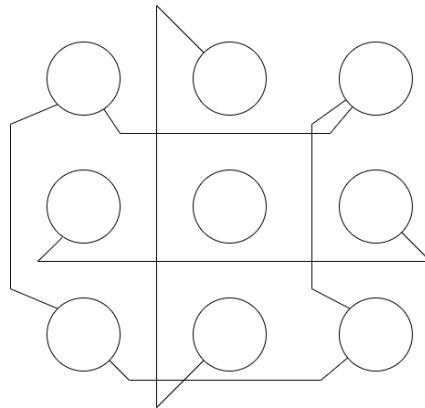


Figura 5.1. visualizzazione di archi non ordinati alle estremità di un torus graph

Per questo motivo viene eseguito un controllo nel caso di analisi di un grafo torus, con l'algoritmo che scansiona la matrice e seleziona gli archi che sono verticali, orizzontali e en assegna le giuste coordinate. Infine la parte di animazione è pressoché uguale come logica. Per quanto riguarda le informazioni della rete che vengono mostrate a schermo si è implementato un effetto contatore sul tempo che scorre ed è presente un ridimensionamento dinamico dei font che si adatta al crescere del grafico, questo per poter rendere sempre leggibile il testo. Per visualizzare le informazioni relative agli switch e ai link è stata realizzata una classe apposita, la quale può venire renderizzata separatamente dai grafici. Il video che produce è una presentazione animata di switch e links, gli switch, correlati con le loro info, vengono mostrati cinque alla volta con un effetto di comparsa e scomparsa, con effetto slide, mostrando poi i successivi cinque switch e relative info. Una volta terminati gli switch si susseguiranno i link, animanti nello stesso modo e comaprendo otto alla volta, mostrando gli endpoints al quale sono collegati e le capacità. Mostriamo graficamente ciò nel capitolo dedicato alle modalità grafiche.

5.2 Modalità grafiche e design

In questo capitolo si vogliono mostrare tutte le configurazioni grafiche, i modi in cui l'algoritmo adatta gli elementi a schermo e le soluzioni trovate. Essendo un progetto che si basa fortemente su un aspetto front-end, questo capitolo sarà focalizzato sul mostrare visivamente cosa può produrre il visualizzatore nelle varie configurazioni possibili. Partiamo con la scelta di design dei colori che rappresentano le intensità di traffico; la scelta è ricaduta su colori ai quali generalmente associamo significati abitudinari e comuni, come il verde per indicare traffico zero o basso, per poi arrivare al giallo per indicare un traffico di intensità media, fino ad arrivare al rosso per indicare il traffico molto intenso o massimo. Le varie gradazioni sono calcolate a partire da valori rgb e distribuiti su una scala che va da 1 (verde) a 100 (rosso), modificando opportunamente le graduazioni intermedie a cavallo tra le diverse colorazioni. Parlando invece del grafo completo, come descritto precedentemente, un grafo completo può essere disposto in modo automatico e imposto tramite coordinate dei nodi dall'utente. Considerandone un esempio, sulla base dello stetto packets file, i due modi di visualizzare il grafo completo possono apparire come nella fig. 5.2 per l'auto-posizionamento e come in fig 5.3 per il posizionamento manuale.

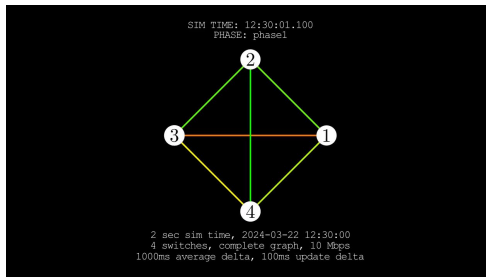


Figura 5.2. visualizzazione per opzione grafo completo con disposizione automatica

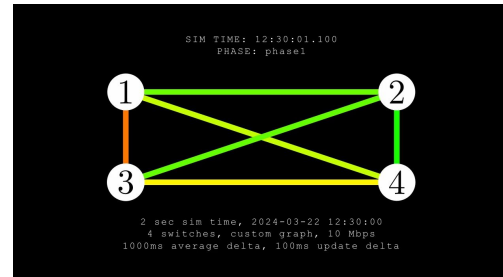


Figura 5.3. visualizzazione per opzione grafo completo con coordinate personalizzate

La scelta di design dietro la visualizzazione del grafo completo in modo circolare è stata fatta per motivi di leggibilità, Manim propone diversi layout di configurazione, come possiamo vedere dall'immagine presa dalla documentazione ufficiale [3] in fig. 5.4. Dagli esempi si nota subito che l'opzione circolare è quella meglio distribuita, il che è ragionevolmente utile quando si tratta di disegnare molti elementi a schermo. I layouts possibili come scelta sono, in ordine di apparizione; spring, circular, kamada kawai, planar, random, shell, spectral e spiral.

Un esempio di grafo completo con modalità auto, settato con 10 switch in modalità circular, lo troviamo in figura 5.5.

Come abbiamo detto nella sezione 3.4, la modalità auto gestisce l'aspect ratio sulla base del numero di switch scelti, vi sono quindi due risultati possibili di visualizzazione; il primo è che il numero di switch combacia con il calcolo dell'aspect ratio e fornisce un riempimento completo della matrice da visualizzare (già visto nel capitolo 3.2 in fig. 3.4), il secondo coincide con un riempimento parziale e in questo caso l'algoritmo lascerà semplicemente dello spazio vuoto (fig. 5.6). La figura 5.6 mostra inoltre il comportamento del grafo qualora si decidesse di settare il parametro `fixedDots`

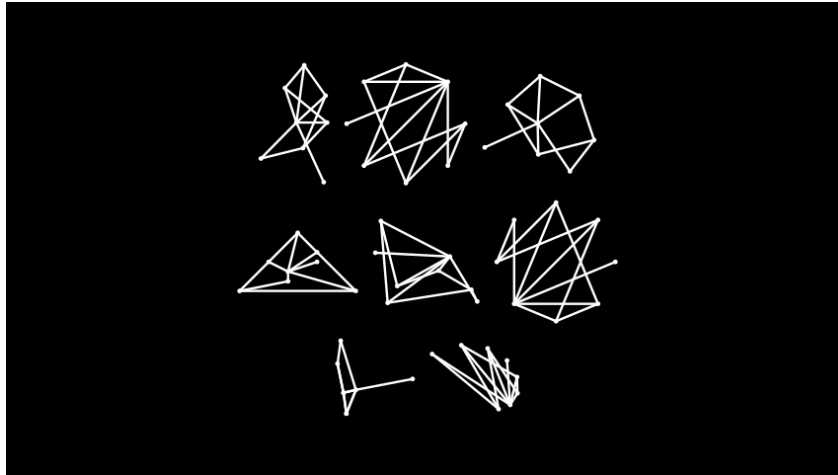


Figura 5.4. layouts possibili per Graph()

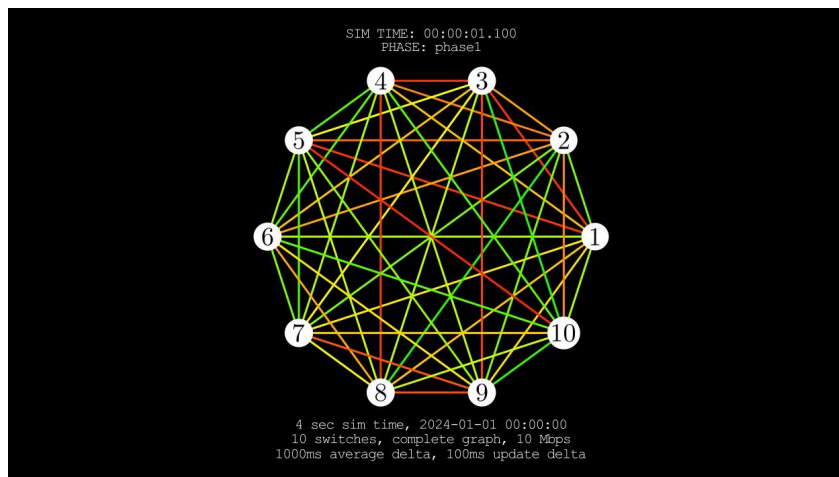


Figura 5.5. visualizzazione grafo completo con disposizione automatica di 10 switch

al valore **fixed**, il quale rende la dimensione dei nodi uguale per tutti, la stessa tipologia di grafo con il parametro settato ad **adaptive** adatterà la dimensione dei nodi in base all'ID con il quale vengono rappresentati, possiamo vedere un esempio in figura 5.7

La logica di riempimento vale anche per il torus graph (fig.), con l'unica differenza che nel caso di mancato riempimento vengono collegati solo i nodi che risultano essere posti alle estremità (fig.). Questa soluzione ibrida segue la convenzione per cui generalmente il torus graph è inteso come completo, ovvero che riempie tutte le posizioni della matrice immaginaria sul quale ci sono i nodi.

Osservando gli esempi del torus graph, si può notare come i link dei nodi delle estremità siano meno spesso degli altri che formano la griglia. Questa è scelta di design volta a rendere maggiormente leggibile il grafo; in questo modo si percepisce subito la tipologia di link a un primo sguardo e il posizionamento dei punti che definiscono i link sono stati studiati appositamente per fare in modo che non si sovrapponevano, mantenendo l'immagine pulita e organizzata. Per quanto riguarda

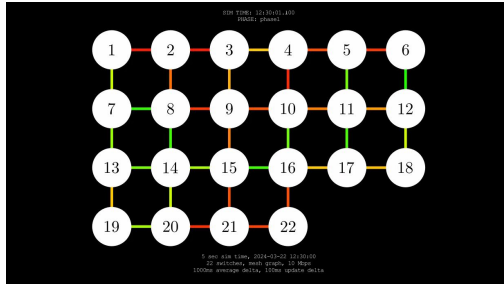


Figura 5.6. visualizzazione grafo mesh completo, opzione dotsSize posta a fixed

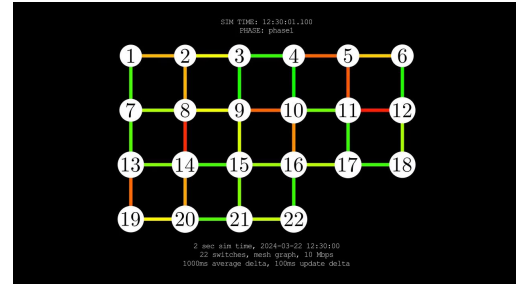


Figura 5.7. visualizzazione grafo mesh con opzione dotsSize posta ad adaptive

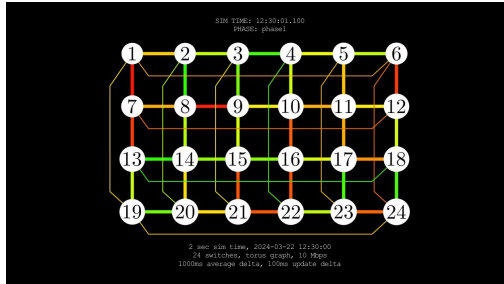


Figura 5.8. grafo torus completo

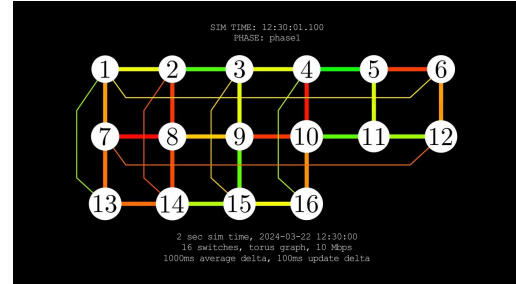


Figura 5.9. grafo torus non completo

la scelta di design dietro il testo visualizzato a schermo, è stato scelto di suddividere le informazioni e distribuirne in due gruppi, uno posto nel margine superiore e l'altro in quello inferiore; il motivo è per dare enfasi al grafico, che rimane centrale nell'economia dell'esperienza, in questo modo il focus principale rimane sul protagonista della scena, mentre i parametri descrittivi della rete sono presenti in modo tale da non essere invasivi. Infine abbiamo la modalità "graph", la modalità in cui l'utente può scegliere dove posizionare i nodi come già visto in fig 3.3 Il visualizzatore possiede anche una modalità per generare un video in cui si mostrano le informazioni degli switch e nei nodi come spiegato nella sezione precedente 5.1. Per dare un'idea di come viene mostrato, riportiamo due frammenti di video in cui vengono mostrate le varie tipologie di dati (fig. 5.10 e fig. 5.11).

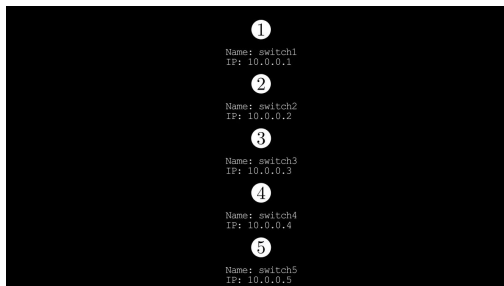


Figura 5.10. switch info

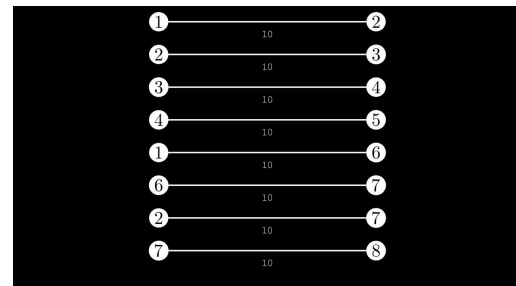


Figura 5.11. link info

5.3 Accessibilità: modalità daltonismo

In un'applicazione in cui i colori sono parte integrante dell'esperienza, è più che opportuno approcciarsi alla progettazione tenendo in considerazione delle possibili implementazioni che possano affrontare la questione del daltonismo. Il daltonismo è una condizione in cui l'occhio umano presenta cecità ereditaria verso uno o più colori. Le forme più comuni sono:

- **protanopia:** sensibilità deficitaria per il colore rosso.
- **deuteranopia:** sensibilità deficitaria per il colore verde.
- **tritanopia:** sensibilità deficitaria per i colori giallo e blu.

Come detto nel capitolo precedente, utilizziamo i colori verde, giallo e rosso per esprimere rispettivamente basso, medio e alto traffico; andando a vedere le varie tipologie più comuni di daltonismo, notiamo da subito che i colori scelti non sono adatti a tutti i tipi di daltonismo. Si è pensato quindi di introdurre l'opzione `colorBlind` che se posta su "yes" cambia i colori in verde per un basso traffico, bianco per traffico medio e fucsia per alto traffico. Il colore bianco e nero sono visti in egual modo da tutti, questo è anche il motivo per cui lo sfondo del visualizzatore è proprio nero, quindi si è deciso di utilizzare il bianco come uno dei colori adatti, mentre per gli altri colori si è fatto ricorso al tool "Coloring for Colorblindness" [5] del Professor Nichols, docente dell' Università del Connecticut, il quale permette di visualizzare una palette cromatica nel modo in cui i vari tipi di daltonismo si manifestano. Mostriamo le due palette cromatiche, quella di default 5.12 e quella scelta per l'opzione daltonismo 5.13.

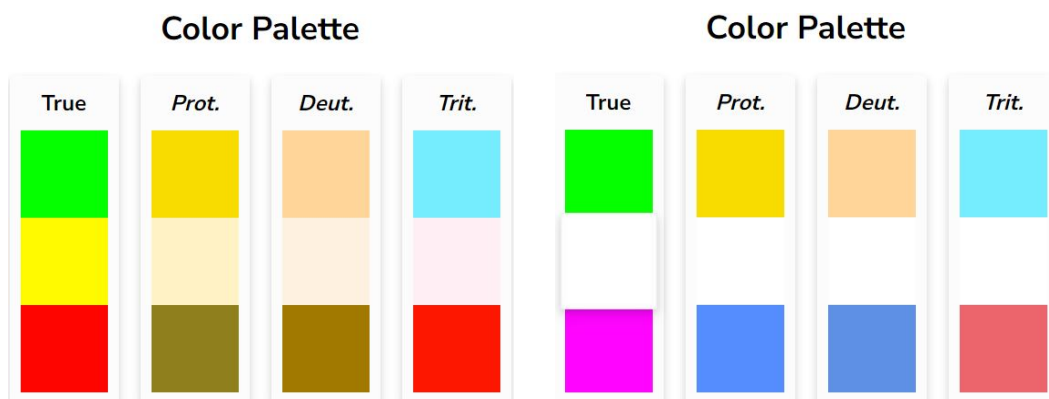


Figura 5.12. palette cromatica di default

Figura 5.13. palette cromatica daltonismo

Come possiamo notare dalle palette cromatiche, quella di default costituirebbe un grosso problema visivo per chi è affetto da protanopia e da deuteranopia, avendo una selezione di colori davvero molto simili tra loro non si potrebbe distinguere efficacemente il livello di traffico. La soluzione proposta risiede nella palette cromatica per daltonismo, in cui i colori scelti si riescono a differenziare per ogni tipologia di condizione visiva, potendo così attribuire al colore verde un livello di traffico nullo o basso, bianco per traffico medio e fucsia per traffico alto o massimo. Un esempio del risultato finale lo possiamo vedere in figura 5.14.

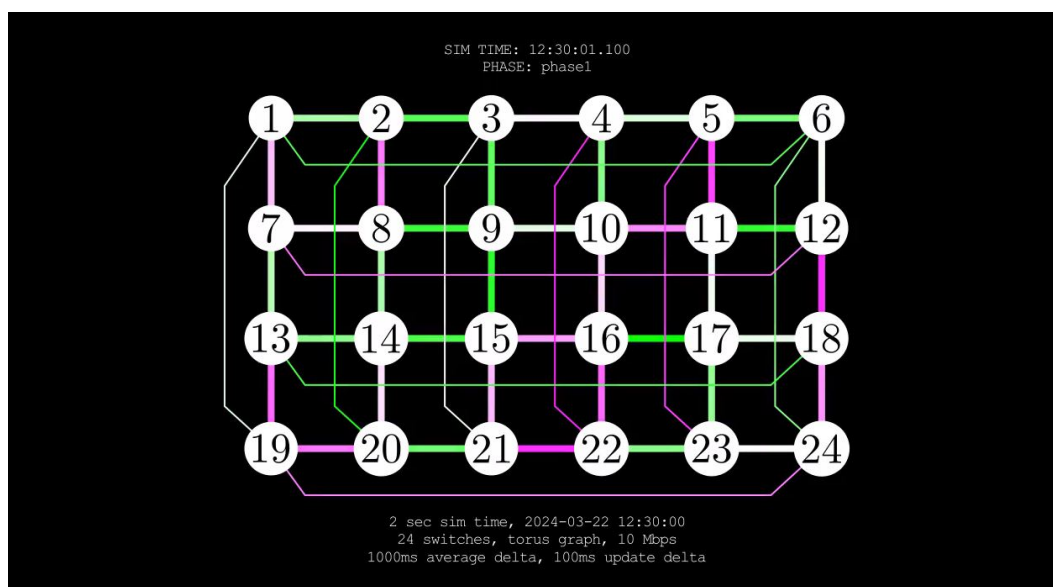


Figura 5.14. opzione colorblind per torus graph

Capitolo 6

Prestazioni e complessità computazionale

Andremo ora ad analizzare le complessità computazionali dei vari componenti del progetto, mostrando anche le prestazioni ottenute in fase di test.

6.1 Generatore di traffico

Analizzando il codice inerente al generatore, un approccio allo studio della complessità potrebbe essere quello di individuare quelle che si ritengono essere i punti computazionalmente critici, al fine di individuare l'andamento degli algoritmi nelle varie situazioni. Essendo lo script dedicato alla creazione della struttura di rete e del traffico, è stato ritenuto opportuno cominciare l'analisi dalla creazione della struttura inerente ai link. Per quanto riguarda la creazione automatica dei links e dei nodi per la tipologia di grafo completo, la funzione dedicata al compito è riportata in figura 6.1

```
def create_auto_complete_links(link_cap, switch_number):
    """ Create links for a complete graph

    Key arguments:
    link_cap: int -- link capacity
    switch_number: int -- switch number

    Returns
    dict -- links representation
    """
    # The arcs representing the links connecting the switches (nodes)
    links = {}
    # The link ID counter
    link_id = 1

    for i in range(1, switch_number + 1):
        for p in range(i, switch_number + 1):
            if i != p:
                if link_id not in links:
                    links[link_id] = link_format(i, p, link_cap)
                    link_id += 1

    return links
```

Codice 6.1. funzione per la creazione automatica di un grafo di rete completo

Poichè in questo caso il numero di link può essere molto elevato, consideriamo il numero di link come n essendo il ciclo for esterno condizionato dal numero di switch. Ma se osserviamo bene notiamo che il ciclo interno parte dall'indice del ciclo for esterno. Non avremo quindi n iterazioni moltiplicato n , ma avremo una quantità di iterazioni totali pari a:

$$O\left(\sum_{i=1}^n (n-i)\right) \quad (6.1)$$

Che andando a sviluppare risulterà essere:

$$O\left(\sum_{i=1}^n (n-i)\right) = O\left(\sum_{i=1}^n n - \sum_{i=1}^n i\right) \quad (6.2)$$

$$= O\left(n \sum_{i=1}^n 1 - \sum_{i=1}^n i\right) \quad (6.3)$$

$$= O\left(n \cdot n - \frac{n(n+1)}{2}\right) \quad (6.4)$$

$$= O\left(n^2 - \frac{n^2+n}{2}\right) \quad (6.5)$$

$$= O\left(\frac{2n^2 - n^2 - n}{2}\right) \quad (6.6)$$

$$= O\left(\frac{n^2 - n}{2}\right) \quad (6.7)$$

$$= O(n^2) \quad (6.8)$$

Poiché il termine lineare è dominato dal termine quadratico per grandi n . Ciò è in linea con la grandezza intrinseca del numero di links per un grafo completo, come visto nell'equazione 3.1, per cui siamo obbligati a una complessità quadratica. Tuttavia possiamo osservare dal calcolo:

$$\sum_{i=1}^n (n-i) = \frac{n^2 - n}{2} = \frac{n(n-1)}{2}$$

IL che è esattamente l'equazione $\frac{n(n-1)}{2}$ che determina il numero di links in un grafo completo. Con questo vogliamo dire che l'algoritmo performa esattamente il numero di iterazioni necessarie a creare i link, ottimizzando al massimo le risorse computazionali. Vi sono poi le varie funzioni dedicate alla creazione delle strutture mesh, torus e graph (la modalità libera), le quali sono tutte basate sul concetto di disporre i nodi su una matrice (griglia). Analizziamo la funzione dedicata alla creazione automatica di un grafo mesh.

```
def create_auto_mesh_links(link_cap, switch_number):
    """ Auto detect links """
    data_links = {}
    link_id = 1

    side = math.sqrt(switch_number)
    # 16/9 aspect ratio
```

```

rows = math.ceil(side * (3/4))
cols = int(side * (4/3))

if (rows * cols) < switch_number:
    cols += 1

switches = [[0 for _ in range(cols)] for _ in range(rows)]
switch_cont = 1
for r in range(0, rows):
    for c in range(0, cols):
        if(switch_cont > switch_number):
            break
        switches[r][c] = switch_cont
        switch_cont += 1

        if c > 0:
            data_links[link_id] = link_format(switches[r][c-1],
                                                switches[r][c],
                                                link_cap)

            link_id += 1
        if r > 0:
            data_links[link_id] = link_format(switches[r-1][c],
                                                switches[r][c],
                                                link_cap)

            link_id += 1
    if(switch_cont > switch_number):
        break
return data_links, switches

```

Codice 6.2. funzione per la creazione automatica di un grafo mesh

Come possiamo vedere nel codice 6.2, la condizione che domina la complessità è rappresentata dai due cicli `for` annidati mentre il resto delle operazioni viene effettuato in tempo costante. I cicli `for` vengono effettuati sui valori `rows` e `cols`, i quali sono derivati dalla radice quadrata nel numero di switch. Nel caso di questa applicazione, in cui è permesso un massimo di 1000 switch, la complessità risulta essere in tempo costante, poichè nel caso peggiore il valore 1000 è considerabile come costante c , avremmo un numero di iterazioni pari a $\sqrt{c} \times \sqrt{c} = c$. Tuttavia lo sarebbe anche se il numero di switch fosse n (con n molto grande). Consideriamo i due cicli `for` annidati, ognuno dei quali itera fino alla radice quadrata di n :

```

for i in range(sqrt(n)):
    for j in range(sqrt(n)):
        # operazioni

```

Poiché ogni ciclo itera \sqrt{n} volte, il numero totale di iterazioni è $\sqrt{n} \times \sqrt{n} = n$. Pertanto, la complessità computazionale è $O(n)$. Analizziamo la funzione dedicata alla creazione automatica di un grafo torus.

```

def create_auto_toro_links(link_cap, switch_number):
    """ Torus graph links auto generator """
    links, switches = create_auto_mesh_links(link_cap, switch_number)
    rows = len(switches)
    cols = len(switches[0])
    links_id = len(links) + 1
    linkList = []

    for _, content in links.items():
        linkList.append(content["endpoints"])

    for i in range(cols):

```

```

    if switches[0][i] != 0 and switches[rows-1][i] != 0 and [switches[0][
        i], switches[rows-1][i]] not in linkList:
        links[links_id] = link_format(switches[0][i], switches[rows-1][i]
            ], link_cap)
        links_id += 1

    for i in range(rows):
        if switches[i][0] != 0 and switches[i][cols-1] != 0 and [switches[i]
            ][0], switches[i][cols-1]] not in linkList:
            links[links_id] = link_format(switches[i][0], switches[i][cols
                -1], link_cap)
            links_id += 1

    return links, switches

```

Codice 6.3. funzione per la creazione automatica di un grafo torus

La funzione 6.3, si serve del codice di creazione mesh graph automatica6.2 per creare i link interni alla struttura e successivamente itera prima sulle colonne per individuare i link che collegano i nodi dell'estremità superiore della matrice con quelli dell'estremità inferiore e, successivamente, itera sulle righe per fare la stessa cosa con i nodi posti alle estremità laterali. Calcolando la complessità abbiamo, il costo computazionale della funzione di creazione automatica dei link di un mesh graph $O(c)$, il quale viene sommato al costo del primo ciclo $O(\sqrt{c})$ e al costo del secondo ciclo $O(\sqrt{c})$ mentre tutte le altre operazioni hanno tempo costante.

$$O(c) + O(\sqrt{c}) + O(\sqrt{c}) = O(c + \sqrt{c} + \sqrt{c}) = O(c + 2\sqrt{c}) = O(c)$$

Tuttavia nel caso ipotetico si abbia un numero elevato di switch, la complessità risulterebbe lineare poichè il calcolo rimarrebbe invariato, con la soltanto eccezione di avere n al posto della costante c . Passando alle funzioni user per la creazione dei link troviamo che le funzioni dedicate per il mesh e torus graph sono logicamente molto simili a quelle auto, con la differenza che in quelle user ci sono dei controlli legati all'inserimento dei valori numerici dei nodi e degli zeri per gli spazi vuoti, sono quindi tutte operazioni che hanno un tempo costante, quindi queste funzioni hanno la stessa complessità delle controparti auto analizzate precedentemente. Diverso il discorso per la funzione per tipo di grafo personalizzato, qui la logica è molto più semplice poichè essendo già tutto descritto nel custom file, si tratta soltanto di ricopiare la struttura dei links così come rappresentata nel file, quindi in un caso peggiore in cui ci sia un numero elevato n di links la complessità sarà lineare.

Successivamente alla creazione dei link, la struttura critica è la creazione dei pacchetti in quanto il loro numero può essere davvero grande.

```

for fractional_unit in range(0, SIM_TIME * creationRate):
    # Changing trafficPercentage every second
    if fractional_unit % creationRate == 0:
        for link, content in links.items():
            content["trafficPerc"] = config_gen_utils.change_traffic_perc(
                content["trafficPerc"], setup["trafficVariation"])

    ENDP_A = 0
    ENDP_B = 1
    for link, content in links.items():
        trafficPerc = content["trafficPerc"]
        # Packets Per Second
        PPS = ((content["capacity"] * 1e6) / 8) / PACKET_SIZE
        timeWalker_toStore = None
        if setup["packetsFile"] == "json":

```

```

        timeWalker_toStore = str(timeWalker) # json non parsa i datetime!
    else:
        timeWalker_toStore = timeWalker
    for i in range(0, int((PPS*(trafficPerc/100))/creationRate) ):
        packet = config_gen_utils.create_packet(content["endpoints"][
            ENDP_A],
                                                content["endpoints"][ENDP_B],
                                                timeWalker_toStore,
                                                PACKET_SIZE)

        packets.append(packet)
        remaining_packets, _ = math.modf((PPS*(trafficPerc/100))/creationRate
        )
    if remaining_packets != 0:
        remaining_packet_size = int(round(remaining_packets, 3) *
        PACKET_SIZE)
        packet = config_gen_utils.create_packet(content["endpoints"][
            ENDP_A],
                                                content["endpoints"][ENDP_B],
                                                timeWalker_toStore,
                                                remaining_packet_size)

        packets.append(packet)
    timeWalker += timedelta(milliseconds=PC_DELTA)

```

Codice 6.4. logica creazione pacchetti

Nel codice 6.4, il ciclo esterno che dipende da `SIM_TIME * creationRate`, sim time è il tempo totale della simulazione di generazione pacchetti, il quale dipende da quanto si vuol fare durare la generazione. La variabile `creationRate` rappresenta in quante parti è suddiviso un secondo, questo è dato dalla scelta del parametro `creationDelta` del file di setup e che indica la frequenza temporale di creazione dei pacchetti, quindi il ciclo dipende dalla quantità di frazioni temporali in cui si generano i pacchetti. Questi paramentri non sono grandi ai fini del progetto, supponendo di avere un sim time di 3600 secondi (un'ora), `creationDelta` posto a 100 millisecondi e un `creationRate` di 10 dato da:

$$\text{creationRate} = \frac{1 \text{ sec}}{\text{creationDelta}} = 10 \quad (6.9)$$

Ne ricaviamo un valore pari a 36000, il quale può essere considerato una costante. Il secondo ciclo che troviamo è all'interno del primo costrutto `if`, il quale scandisce tutti i link per cambiarne le percentuali di traffico da creare; il caso peggiore qui è il caso di grafo completo avente un numero di link riportato nell'equazione 3.1, quindi con complessità quadratica, tuttavia è bene precisare che il progetto vuole rappresentare maggiormente la rete in un data center, la quale nella realtà non è mai costruita come un grafo completo poichè i costi sarebbero proibitivi e la complessità aumenta notevolmente, piuttosto è comune avere delle rappresentazioni come il grafo mesh o torus, per questo motivo d'ora in poi consideremo numerazioni di links e nodi legati soltanto a questi due tipi di grafi. Analizzando i grafi mesh e torus troviamo che la quantità di link che possiamo considerare è costante, infatti se consideriamo n il numero di switch, troviamo che il numero l di link di un grafo torus è dall'equazione:

$$l = \frac{4n}{2} = 2n \quad (6.10)$$

Poichè ogni nodo ha 4 nodi adiacenti che vengono contati due volte. Essendo il grafo torus più ricco di links rispetto al grafo mesh, definisce il caso peggiore

tra i due risultando così $O(\frac{4c}{2}) = O(c)$, essendo il numero di switch massimo pari a 1000 quindi costante. Una precisazione sulla funzione `change_traffic_perc()`, la quale opera in tempo costante poichè ha solo il compito di cambiare il valore di percentuale di traffico. Il secondo ciclo che troviamo ha all'interno un altro ciclo, il primo itera sempre sui links, il secondo itera per il numero di pacchetti da creare, dato un certa percentuale di traffico, in una data frazione temporale. Troviamo quindi che la variabile PPS (che indica il numero di pacchetti al secondo massimi che un link può trasportare), può essere molto grande, è quindi il nostro n . Possiamo quindi affermare che il parametro dominante per la complessità sia:

$$O\left(\frac{\text{PPS}(\frac{\text{trafficPerc}}{100})}{\text{creationRate}}\right) = O\left(\frac{cn}{c}\right) = O(n) \quad (6.11)$$

La funzione `create_packet()` opera in tempo costante poichè semplicemente formatta in modo corretto il pacchetto da salvare, così come operano in tempo costante tutte le restanti operazioni. Facendo quindi una somma di tutte le complessità riguardanti i punti critici 6.5 troviamo che la complessità di questo pezzo logico di codice è $O(n)$ 6.12, quindi lineare.

```

0(c)    for fractional_unit in range(0, SIM_TIME * creationRate):
0(1)        if fractional_unit % creationRate == 0:
0(c)            for link, content in links.items():
0(1)                content["trafficPerc"] = config_gen_utils.
                    change_traffic_perc(content["trafficPerc"], setup["trafficVariation"])
0(1)            # operazioni
0(c)            for link, content in links.items():
0(1)                # operazioni
0(n)                for i in range(0, int((PPS*(trafficPerc/100))/creationRate)):
0(1)                    # operazioni
0(1)                # operazioni
0(1)            # operazioni

```

Codice 6.5. complessità della logica di creazione pacchetti

Tirando le somme, la complessità globale per il generatore può dirsi essere lineare, come lo mostrano anche i test effettuati in figura 6.1. I test hanno come parametri un tempo di generazione pari a due secondi, link con capacità di 1 Gbps in un grafo di tipo torus. Si può vedere che all'aumentare del numero di nodi (switch) il tempo necessario a generare i pacchetti cresce in modo lineare.

$$O(c(c + cn)) = O(c^2 + c^2n) = O(n) \quad (6.12)$$

6.2 Analizzatore di traffico

Il cuore dell'analizzatore è la parte logica di codice incaricata di scandire tutti i pacchetti, estrarne le somme dei valori di payload e relative vedie percentuali. L'analizzatore in primis carica i due files `network.yaml` e `packets.json/yaml`, in questo caso creiamo sempre una struttura ausiliaria necessaria a memorizzare man mano le somme pei payload; ciò consiste semplicemente in un ciclo for che scandisce la lista di link presente nel network file e quindi abbiamo tempo costante $O(c)$, ricordando che stiamo analizzando come caso peggiore un numero di link presenti

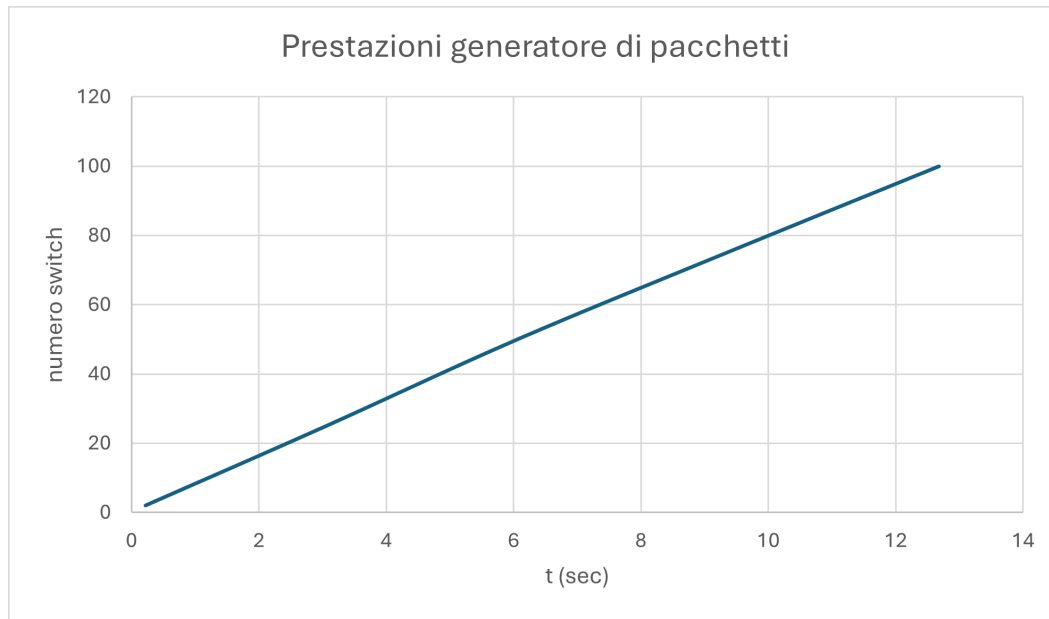


Figura 6.1. Prestazioni per il generatore di traffico

un un torus graph, come mostrato precedentemente in fig. 6.10. Analizziamo ora il codice 6.6 in cui avviene l'analisi vera e propria.

```
# Every loop is an analyzed fractional unit
while timeWalker <= startTime + (simTime - updateDelta):
    # For each updateDelta reset values
    for link, content in links.items():
        # Reset traffic
        content["trafficUDT"] = 0
    # Identify the link belonging to the analyzed packet
    if packet is not None:
        link = links[frozenset({packet["A"], packet["B"]})]
        # Analyzing every packet in the analyzed range
        print("analyzing time:", packet["t"])
        packetTimestamp = None
        if networkData[SIM_PARAMETERS]["packetsFile"] == "json":
            packetTimestamp = utils.str_to_datetime(packet["t"])
        else:
            packetTimestamp = packet["t"]
        while packetTimestamp >= timeWalker and packetTimestamp <
            timeWalker + updateDelta:
            link["trafficUDT"] += packet["d"]
            link["trafficDT"] += packet["d"]
            packet = next(packetsDataIterator, None)
        if packet is not None:
            if networkData[SIM_PARAMETERS]["packetsFile"] == "json":
                packetTimestamp = utils.str_to_datetime(packet["t"])
            else:
                packetTimestamp = packet["t"]
            link = links[frozenset({packet["A"], packet["B"]})]
        else:
            break
    # Pushing forward the analyzing time
    timeWalker += updateDelta
    # Storing the fractional time units values
    for link, content in links.items():
        content["updateDeltaTraffic"].append(
            {"updateTime": timeWalker, "traffic": content["trafficUDT"]})
```

```

    )

    # Storing the averageDelta units value
    # If the averageDelta average is not the first one
    if timeWalker > startTime + averageDelta:
        for link, content in links.items():
            # Calcolate the element index to subtract from '
            # updateDeltaTraffic '
            index = (len(content["updateDeltaTraffic"]) - 1) -
                lastFirstUDindex
            # Traffic value to subtract from the averageTraffic
            traffic_to_subtract = content["updateDeltaTraffic"][index]["
                traffic"]
            content["trafficDT"] -= traffic_to_subtract
            content["traffic"].append({"updateTime": timeWalker, "traffic
                ": content["trafficDT"]})
    # Else if the averageDelta average is the first one:
    # in this case we don't need to subtract an updateDeltaTraffic
    elif timeWalker == startTime + averageDelta:
        for link, content in links.items():
            content["traffic"].append({"updateTime": timeWalker, "traffic
                ": content["trafficDT"]})

```

Codice 6.6. logica analisi pacchetti

Il primo ciclo while scandisce semplicemente le unità frazionarie temporali scandite da updateTime, come visto precedentemente con l'esempio in fig. 6.9, ciò comporta un numero di iterazioni $O(c)$. Segue un ciclo for che itera sui link, anche qui abbiamo una complessità di $O(c)$. Dopo diverse operazioni con tempo $O(1)$, la parte che merita attenzione è il ciclo while nidificato. Questo ciclo itera su tutti i pacchetti che hanno un timestamp che ricade nell'unità frazionaria di tempo da analizzare, sono quindi tutti i pacchetti in un dato updateDelta per un dato traffico percentuale; abbiamo già incontrato questo parametro e ne abbiamo calcolato il peso in termini computazionali nell'equazione 6.11, ottenendo $O(n)$. Dopo diverse operazioni, tutte con complessità $O(1)$, i cicli che troviamo sono tre, interessano iterazioni sui link, ciascuno con complessità $O(c)$, e non sono annidati poichè si susseguono. Possiamo quindi definire la complessità complessiva di questa parte logica che risulta essere lineare. 6.13.

$$O(c(c + n + c + c)) = O(c^2 + cn + c^2 + c^2) = O(c + n) = O(n) \quad (6.13)$$

Un'eventuale conferma arriva dai test dove possiamo vedere l'andamento lineare nel grafico 6.2. Possiamo notare che all'aumentare del numero di switch nella rete, il tempo cresce in modo lineare.

6.3 Visualizzatore grafico

Analizzando il visualizzatore troviamo che il cuore da analizzare ricade sulla parte di codice che crea le animazioni. Nel creare le strutture necessarie, caricandole dai files, troviamo le stesse complessità computazionali ricavate per i precedenti moduli software, mentre per la creazione della base di partenza grafica abbiamo la funzione **Graph()** per disegnare i grafi completi mentre abbiamo il codice visto in fig. 5.4 per i grafi mesh, torus e personalizzato. Per quanto riguarda **Graph()** rimane valida



Figura 6.2. prestazioni dell'analizzatore

l'analisi di complessità quadratica per via nel calcolo del numero di link in un grafo completo, mentre per la creazione delle altre tipologie di grafo osserviamo dalla fig. 5.4 che la complessità è costante, essendo riproposti due cicli annidati che iterano sulla radice quadrata del numero di nodi. Analizziamo quindi la logica che risulta maggiormente critica, la creazione delle animazioni che, per motivi di lunghezza del codice sarà descritto come pseudocodice:

```
while time_walker <= end_time:
    animations = []
    # definig all the traffic color links at timeWalker time
    for content in traffic_data[CONST.ANALYZED_DATA["TRAFFICS"]]:
        color_perc = int(content["traffic"][traffic_count])
        animations.append(animation for the link in content)
    # playing animations
    if(time_walker == phase_time):
        self.play(every traffic animation and the changing phases text
                  animation)
    else:
        self.play(every traffic animation)
    traffic_count += 1
    # pushing forward sim time to check
    time_walker += timedelta(milliseconds=show_delta)
```

Codice 6.7. logica creazione animazioni

Il primo ciclo while itera su ciascuna unità frazionaria, il quale numero sappiamo essere costante, quindi $O(c)$, vengono scanditi i link nel for interno andando a prendere il valore del traffico percentuale per l'unità frazionaria analizzata, abbiamo quindi $O(c)$. Si disegnano le animazioni e il resto sono operazioni con complessità $O(1)$. La libreria non dichiara la complessità che può interessare il metodo `play()`, tuttavia i parametri di ingresso rappresentano principalmente una lista di animazioni e diversi `mobject` di tipo `Text()`. La complessità in questo caso possiamo ricavarla dai test, i quali mostrano che l'algoritmo opera, nella sua interezza, in tempo lineare.

Il grafico in fig. 6.3 si basa su una simulazione di 5 secondi con tipologia grafo mesh; possiamo notare che al crescere del numero degli switch il tempo per il rendering del video cresce in modo lineare. Possiamo concludere che il codice in

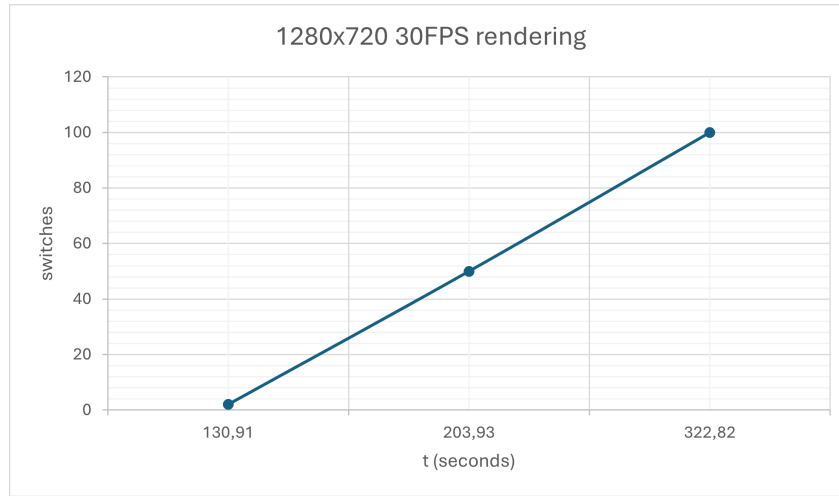


Figura 6.3. prestazioni per video con risoluzione di 720p a 30 fps

fig. 6.7, opera con complessità $O(n)$. Ipotizzando quindi un caso d'uso realistico in cui non viene previsto un grafo completo nell'impiego di una rete di data center possiamo concludere che la complessità generale del visualizzatore sia il peso della creazione delle strutture, caricamento dal files e creazione base grafica, sommato al peso dato dalla parte di animazione ottenendo complessità lineare come riportato nell'equazione 6.14.

$$O(c + n) = O(n) \quad (6.14)$$

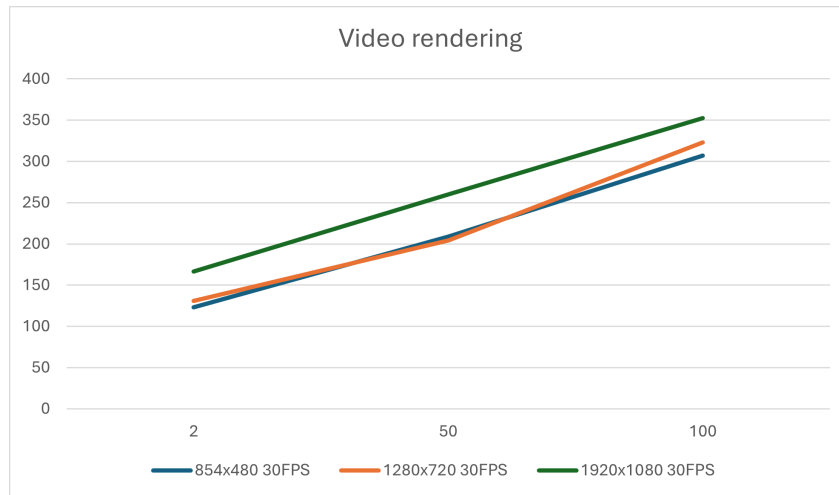


Figura 6.4. comparazione prestazioni per risoluzioni di 480, 720p e 1080 a 30 fps

Volendo osservare i test da un'altra prospettiva, possiamo intendere il tempo di rendering come la variabile dipendente rispetto al numero di switch; in questo esempio mostriamo una comparazione con le risoluzioni 480p, 720p e 1080p renderizzati a 30 fps(frames per second), sempre per 5 secondi di simulazione con grafo mesh, come

mostrato in fig. 6.4. Possiamo osservare dal grafico che l'andamento è lineare per tutti i tipi di rendering analizzati.

Capitolo 7

Conclusioni

Facendo un riepilogo dei punti cardine dello sviluppo del progetto, si è potuto giungere a diverse conclusioni. Dal punto di vista delle prestazioni implicate dai formati scelti json e yaml, si è dimostrato che json è incredibilmente più performante rispetto a yaml per quanto riguarda files di grandi dimensioni, possiamo vederne un risultato nel test raffigurato in fig. 7.1.

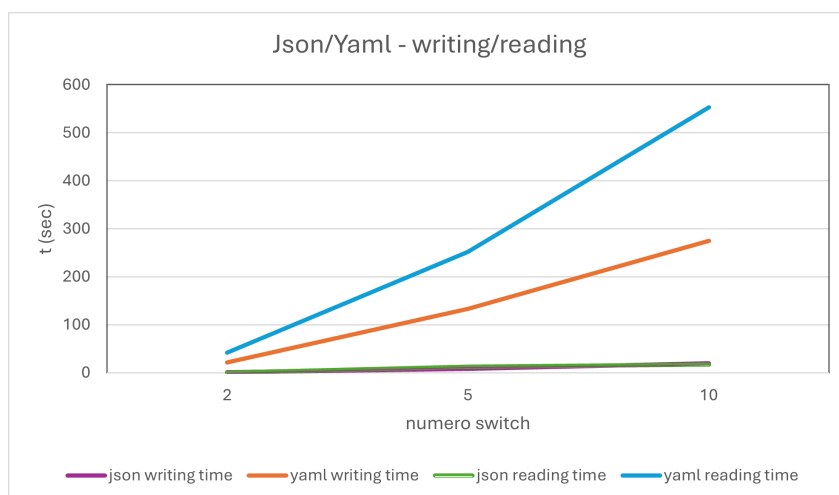


Figura 7.1. comparazione prestazioni json e yaml, scrittura e lettura

Il test è basato sulla configurazione avente tempo di generazione 5 secondi e tipologia di grafo mesh con links aventi capacità 1 Gbps. In questo caso, così come anche i futuri test che verranno riportati, si considera il tempo come la variabile dipendente dal numero di switch impiegati. Possiamo osservare dal test che json è decisamente più veloce di yaml sia in scrittura che in lettura, tanto da avere tempi praticamente sovrapposti, mentre per yaml, seppur con un andamento lineare, ha un coefficiente angolare che fa pesare molto di più l'andamento della curva. Quindi possiamo concludere che json è decisamente la scelta più opportuna per i fini del progetto. Risulta comunque interessante notare l'andamento di json nella lettura e scrittura per un numero di switch superiore a 7; avendo la stessa configurazione di test precedente otteniamo i grafici in fig. 7.2 e 7.3.

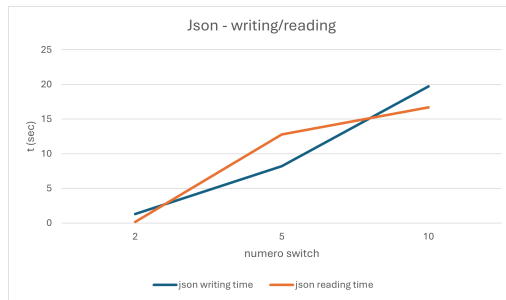


Figura 7.2. json, lettura e scrittura da 2 a 10 switch

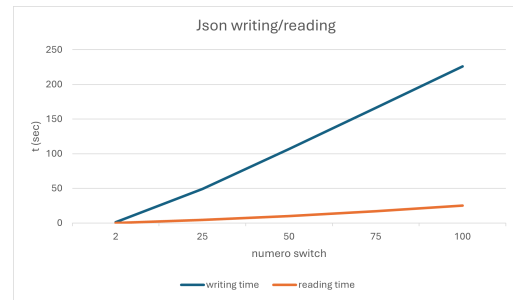


Figura 7.3. json, lettura e scrittura da 2 a 10 switch

Osservando i grafici notiamo come il carattere degli andamenti di scrittura e lettura di json prenda forma a partire da una configurazione con 7 switch, delineando un andamento lineare in entrambi i casi, con un'ottima performance per la lettura. Per quanto riguarda il peso dei files prodotti abbiamo visto yaml produce files decisamente più piccoli di json, possiamo farci un'idea dai dati registrati in fase di test in fig. 7.4.

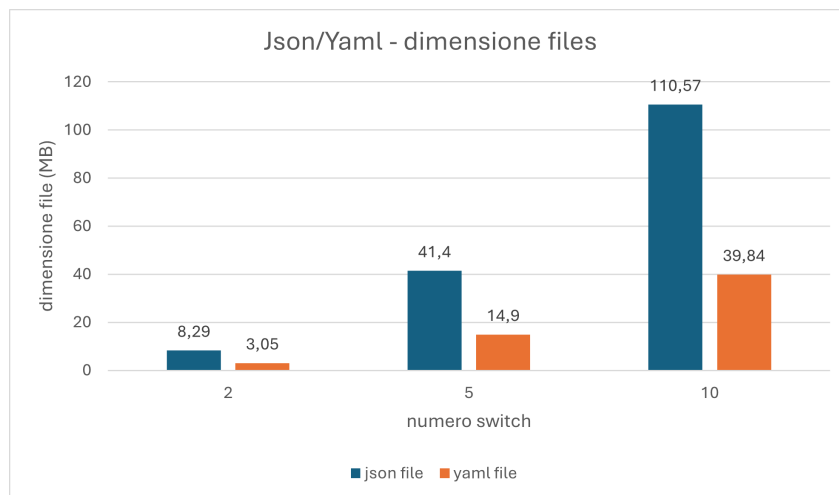


Figura 7.4. comparazione dimensioni files json e yaml

Possiamo concludere che la dimensione dei file json è in media 2.7 volte maggiore rispetto ai corrispondenti file yaml, indicando un rapporto di dimensione di circa 2.7 tra i due formati. Ciò è chiaramente un pro nei confronti di yaml, tuttavia la velocità che riesce a garantire json è talmente superiore da far propendere per un compromesso in termini di dimensione dei files, rendendo quindi json una scelta preferenziale. Per quanto riguarda generatore, analizzatore e visualizzatore grafico, possiamo concludere che tutti i moduli del progetto operano in tempo lineare, fatta eccezione della tipologia di grafo completo che intrinsecamente porta dietro di sé una natura di complessità quadratica, rappresentando così un'ottimo risultato in termini prestazionali. Un'altra conclusione, non banale, riguarda l'essere riusciti a realizzare un prodotto di analisi di rete da una libreria che nasce come scopi relativi a video esplicativi matematici, come possono essere grafi cartesiani animati,

spazi vettoriali animati e così via; si è riusciti quindi a sfruttare la libreria per scopi non strettamente inerenti ai suoi scopi di esistenza, questo processo di adattabilità ha portato a un percorso formativo decisamente creativo, sperimentando nuove soluzioni con i mezzi forniti. Questo processo fa sì che ci siano ampi margini di manovra per applicazioni future, sia legati al concetto di cosa si propone di fare questo progetto sia in termini di integrazioni future di caratteristiche; il concetto che sta alla base del progetto può essere allargato al di fuori di un data center e trovare altri terreni in cui potersi adattare, sfruttandone le caratteristiche di base si potrebbe adattare l'applicazione ad esempio per il traffico di reti stradali in cui i nodi sono rappresentati da punti d'interesse, raggiungibili tramite strade (i link) e con i pacchetti che rappresentano i veicoli, analizzandone il traffico, oppure per reti di gioco multiplayer massivo (MMO), in cui la topologia mesh può essere utilizzata per gestire la comunicazione tra server distribuiti geograficamente, reti di sensori in cui la topologia mesh permette ai dispositivi di comunicare anche in condizioni ambientali difficili o in scenari dove i nodi sono distribuiti in modo irregolare, gli ambiti sono potenzialmente tanti. Un'altra caratteristica di Manim che può essere sfruttata in futuro è la possibilità di renderizzare video in 3D, infatti la libreria supporta anche mobject e spazio vettoriale 3D e potrebbe essere interessante rappresentare ad esempio una rete satellitare che faccia uso di topologie torus e mesh, potendo rappresentare la tridimensionalità di un'orbita terrestre, oppure reti di droni, in cui la topologia mesh permette ai nodi di comunicare direttamente l'uno con l'altro senza necessità di un'infrastruttura centrale e potendo sfruttare lo spazio 3D per rappresentare i droni.

Ringraziamenti

Questo percorso è stato per il sottoscritto una grande opportunità sotto diversi punti di vista; ha rappresentato grande fonte di arricchimento professionale e personale, mi ha fornito competenze complementari agli insegnamenti ricevuti durante il mio percorso di studi soprattutto in ambito front-end, ho approfondito la mia comprensione in tutti i campi incontrati, acquisito nuove competenze tecniche e consolidate altre con cui sono entrato in contatto precedentemente. Personalmente trovo di non poter concludere meglio di così il mio percorso accademico, avendo avuto l'opportunità di dedicare gli sforzi, in questa prova finale, verso qualcosa su cui nutro forte interesse, ovvero la programmazione di elementi grafici e loro animazioni in modo programmatico. Ed è in termini di opportunità ricevuta che desidero esprimere la mia sincera gratitudine al mio Relatore, Daniele De Sensi, per avermi accolto, per essersi prodigato tanto per trovare l'ambito di interesse che mi sarebbe piaciuto affrontare, per la sua guida e per il supporto inestimabile e prezioso, fondamentale per il mio sviluppo professionale durante questo periodo.

Desidero ringraziare la mia compagna di vita, Chiara, il mio faro nella notte, senza la quale questo traguardo probabilmente non sarebbe stato possibile, per il supporto costante, la pazienza e per aver creduto fortemente in me e la mia piccola Giulia, Atena, mia figlia, che ogni giorno mi insegna un pezzo di vita, gioia e speranza.

Ringrazio la mia famiglia, per l'amore, il supporto costante e la pazienza che hanno avuto nel mio lungo e tortuoso percorso.

Desidero ringraziare gli amici che mi hanno accompagnato durante il percorso, la comitiva affettuosamente ribattezzata "League of Dogs", per l'immensa compagnia, per le risate e i bei momenti spensierati passati insieme.

Un doveroso ringraziamento va a Lucio Molo e Mauro Semproni, miei colleghi universitari e cari amici, che hanno condiviso con me parte della mia vita accademica e mi hanno aiutato a viverla il più serenamente possibile. Senza di loro sarebbe stato tutto immensamente più vuoto.

Bibliografia

- [1] Stephen Cass Author. *The Top Programming Languages 2023*. <https://spectrum.ieee.org/the-top-programming-languages-2023>. Accessed: 2024-04-12. 2023.
- [2] Canonical. *PyYAML Documentation*. Accessed: 2024-04-12. 2024. URL: <https://pyyaml.org/wiki/PyYAMLDocumentation>.
- [3] Manim Community. *Graph Class Documentation*. Accessed: 2024-04-12. 2024. URL: <https://docs.manim.community/en/stable/reference/manim.mobject.graph.Graph.html>.
- [4] Cytoscape Consortium. *Cytoscape: An Open Source Platform for Complex Network Analysis and Visualization*. <https://cytoscape.org>. Accessed: 2024-04-12. 2024.
- [5] David Nichols. *Color Blindness Palette Generator*. <https://davidmathlogic.com/colorblind>. Accessed: 2024-04-12. 2024.
- [6] Gephi. *Gephi: The Open Graph Viz Platform*. <https://gephi.org>. Accessed: 2024-04-12. 2024.
- [7] Graphviz. *Graphviz - Graph Visualization Software*. <https://graphviz.org>. Accessed: 2024-04-12. 2024.
- [8] igraph. *igraph - The Network Analysis Package*. <https://igraph.org>. Accessed: 2024-04-12. 2024.
- [9] Institute of Electrical and Electronics Engineers. *IEEE - Advancing Technology for Humanity*. <https://www.ieee.org>. Accessed: 2024-04-12. 2024.
- [10] Johns Hopkins University. *Homepage of Johns Hopkins University*. <https://www.jhu.edu/>. Accessed: 2024-04-12. 2024.
- [11] Johns Hopkins University Libraries. *Network Data Visualization Guide*. <https://guides.library.jhu.edu/datavisualization/network>. Accessed: 2024-04-12. 2024.
- [12] Pajek. *Pajek - Program for Large Network Analysis*. <http://mrvar.fdv.uni-lj.si/pajek/>. Accessed: 2024-04-12. 2024.
- [13] Jon Postel. *Internet Protocol*. RFC 791. Accessed: 2024-04-12. RFC Editor, 1981. URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc791#page-11>.
- [14] Python Software Foundation. *8.3. Mapping Types — dict*. Accessed: 2024-04-12. 2023. URL: <https://docs.python.org/3/library/stdtypes.html#typesmapping> (visitato il 12/04/2024).

- [15] Python Software Foundation. *datetime* — Basic date and time types. *timedelta Objects*. Accessed: 2024-04-12. 2023. URL: <https://docs.python.org/3/library/datetime.html> (visitato il 12/04/2024).
- [16] Python Software Foundation. *Glossary* — Python 3.10.8 documentation. Term: *hashable*. Accessed: 2024-04-12. 2023. URL: <https://docs.python.org/3/glossary.html#term-hashable> (visitato il 12/04/2024).
- [17] Python Software Foundation. *JSON encoder and decoder* — Python 3.10.8 documentation. Accessed: 2024-04-12. 2024. URL: <https://docs.python.org/3/library/json.html>.
- [18] Python Software Foundation. *Python Programming Language* — Official Website. <https://www.python.org>. Accessed: 2024-04-12. 2024.
- [19] Y. Shafranovich. *Common Format and MIME Type for Comma-Separated Values (CSV) Files*. RFC 4180. Accessed: 2024-04-12. RFC Editor, 2005. URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc4180.html#page-2>.
- [20] SocNetV. *Social Network Visualizer (SocNetV)*. <https://socnetv.org>. Accessed: 2024-04-12. 2024.
- [21] The Manim Community Developers. *Manim Documentation: Quickstart Guide*. Accessed: 2024-03-25. 2024. URL: <https://docs.manim.community/en/stable/index.html>.
- [22] The Manim Community Developers. *Manim Documentation: Quickstart Guide*. Accessed: 2024-03-25. 2024. URL: <https://docs.manim.community/en/stable/tutorials/quickstart.html>.
- [23] UCINET. *UCINET Software*. <https://sites.google.com/site/ucinetsoftware/>. Accessed: 2024-04-12. 2024.
- [24] Wikipedia contributors. *File:Torus_graph.png*. https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Torus_graph.png. Accessed: 2024-04-12. 2024.
- [25] YAML Core Team. *YAML Ain't Markup Language (YAML™) Version 1.2*. <https://www.rfc-editor.org/info/rfc9512>. Accessed: 2024-04-12. 2009.