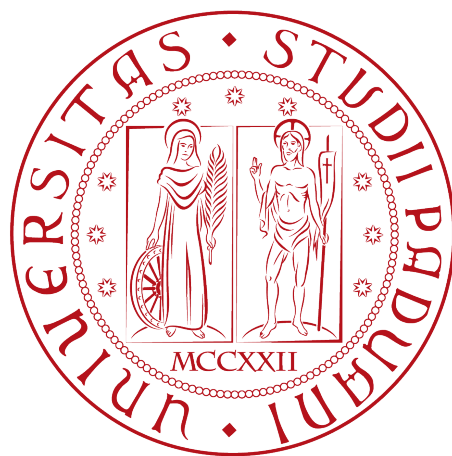


Università degli Studi di Padova

DIPARTIMENTO DI MATEMATICA ‘TULLIO LEVI-CIVITA’

CORSO DI LAUREA IN INFORMATICA



Sviluppo di una piattaforma di video streaming per l'assistenza remota tramite dispositivi wearable

Tesi di laurea triennale

Relatore

Prof. Tullio Vardanega

Laureando

Filippo Berto

ANNO ACCADEMICO 2016–2017

“The first precept was never to accept a thing as true until I knew it as such without a single doubt.”

René Descartes

Convenzioni

Sono descritte in questa pagina le convenzioni impiegate all'interno del documento.

Immagini e didascalie

Le didascalie delle immagini riportano la sorgente originaria, l'autore dell'oggetto e, se presente, la licenza con cui è stato distribuito. Se la licenza è assente, l'utilizzo dell'immagine è da considerarsi *Fair Use*. Se la sorgente non è presente, l'immagine è stata realizzata dall'autore del documento e viene rilasciata secondo la licenza del documento stesso.

Indice

Convenzioni	5
Indice	6
Elenco delle figure	8
Elenco delle tabelle	9
1 L'azienda	10
1.1 Prodotti e servizi	10
1.2 Come lavora	10
1.2.1 Modello di sviluppo	10
1.2.2 Progetti importanti	12
1.2.3 Premi e certificazioni	13
1.3 Tecnologie utilizzate dall'azienda	13
1.3.1 Rackspace	13
1.3.2 Firebase	14
1.3.3 Java	15
1.3.4 Git e Bitbucket	18
1.3.5 G Suite	19
1.3.6 WordPress	19
1.4 Rapporto con l'innovazione	20
2 Scelta dello stage e rapporto con l'azienda	22
2.1 Lo stage per l'azienda	22
2.1.1 Necessità dell'azienda	22
2.1.2 Risultati degli stage precedenti e seguito degli stagisti nell'azienda	23
2.2 Rapporto con il mio stage e con l'azienda	23
2.2.1 Ambiti di interesse	23
2.2.2 Proposte di stage ricevute	24
2.2.3 Scelta dello stage	24
2.2.4 Scelta dell'azienda	24
2.3 Obiettivi del progetto di tirocinio	25
2.3.1 Obiettivi obbligatori	25
2.3.2 Obiettivi desiderabili	25
2.3.3 Vincoli tecnologici	25
2.4 Pianificazione del lavoro	25
2.4.1 Strumenti utilizzati	26
3 Il prodotto	27
3.1 Acquisizione delle conoscenze settoriali	27
3.1.1 Codifica video	27
3.1.2 Formati video comunemente usati	27

3.1.3	Protocolli	28
3.1.4	Architettura di una piattaforma di streaming	31
3.1.5	Trasmissione dei contenuti in mobilità	32
3.1.6	Reti per dispositivi mobile	32
3.2	Nuovi orizzonti	33
3.2.1	Blockchain	33
3.2.2	Streaming peer to peer	35
3.3	Analisi delle soluzioni esistenti	35
3.3.1	YouTube	35
3.3.2	Netflix	35
3.3.3	Red5 Pro	36
3.3.4	Contus Vplay	36
3.3.5	Streamroot	36
3.4	Analisi dei requisiti	37
3.4.1	Analisi preliminare	37
3.4.2	Definizione dei casi d'uso	37
3.5	Struttura della piattaforma	38
3.5.1	Protocolli	38
3.5.2	Diagramma delle classi	39
3.6	Tecnologie utilizzate	40
3.6.1	Linguaggi — Java	40
3.6.2	Piattaforma — Apache Tomcat 8	40
3.6.3	Tipo di dati scambiati — JavaScript Object Notation (JSON) vs Extensible Markup Language (XML)	41
3.6.4	Strumenti di supporto	41
3.7	Qualifica	42
3.7.1	Verifica	42
3.7.2	Validazione	43

Elenco delle figure

1.1	Logo di Vision Lab Apps S.r.l.	10
1.2	Ciclo di vita di Scrum	11
1.3	Schema di funzionamento di VisionHealthCare	12
1.4	Schema di funzionamento di Google Cardboard	13
1.5	Logo di Unicredit Start Lab	13
1.6	Schema di rete generale di un'applicazione su Rackspace	14
1.7	Usecase generale di Firebase	15
1.8	Compilazione di Java e utilizzo su più piattaforme	16
1.9	Architettura di Android	17
1.10	Esempio di grafo di lavoro in Git	18
1.11	Schema generale di una pipeline in Bitbucket	18
1.12	I prodotti di G Suite	19
1.13	Architettura di una pagina WordPress e gerarchia delle pagine	20
2.1	Schema generale del funzionamento della piattaforma di streaming	22
2.2	Schema delle componenti in fase di sviluppo	23
2.3	Diagramma di Gantt della pianificazione	26
3.1	Schema di connessione di TCP e UDP	29
3.2	Schema generale di una piattaforma di streaming	31
3.3	Schema di funzionamento di una blockchain	34
3.4	Architettura di Contus Vplay	36
3.5	Diagramma dei casi d'uso del sistema	37
3.6	Diagramma delle classi del sistema	39

Elenco delle tabelle

1 L'azienda



Figura 1.1: Logo di Vision Lab Apps S.r.l.

Vision Lab Apps S.r.l. è una startup nata a New York nel 2011, con sede operativa a Torri di Quartesolo (VI), impegnata nello sviluppo di tecnologie di *ubiquitous computing* per i settori sanitario, manifatturiero e della sicurezza.

1.1 Prodotti e servizi

I prodotti principali di Vision Lab Apps sono software personalizzati, siti web e contenuti video. L'azienda, inoltre, offre un servizio pubblicitario per le nuove aziende: costruisce il *brand* del cliente, pone le fondamenta della sua rete di clienti e si occupa di consulenze e di *SEO*.

Con il crescere del team e l'acquisizione di nuovo personale più specializzato, Vision Lab Apps si sta espandendo verso servizi cloud per le aziende e software per dispositivi *wearable* e *IoT*; questi sono i primi approcci al modello di *ubiquitous computing* e permettono ai loro utenti una maggiore integrazione con la rete di informazioni e sensori che li circondano nella vita quotidiana. L'azienda sta sviluppando particolarmente il campo dei visori per realtà aumentata come supporto alle attività lavorative, promettendo grandi innovazioni nel settore manifatturiero.

1.2 Come lavora

1.2.1 Modello di sviluppo

Vision Lab Apps lavora con il modello di sviluppo *Agile* di tipo *Scrum*. Questo modello pone una minore rigidità sulla documentazione e sulle formalità del prodotto, permettendo modifiche in corso d'opera e una collaborazione più rilassata tra cliente e fornitore.

Scrum definisce uno *sprint* come l'unità di misura dello sviluppo di un progetto, un periodo di tempo di lunghezza fissata generalmente tra una settimana e quattro settimane. L'insieme delle attività necessarie per l'avanzamento del progetto sono organizzate nel *backlog* del prodotto. Per ogni *sprint* il team pianifica quali di questi *task* dovranno essere svolti e a chi andrà assegnato ciascuno di essi, definendo così il *backlog* dello sprint.

Ogni giorno il team si ritrova con una breve riunione, detta "*daily scrum*", per controllare lo stato dei *task* e degli obiettivi. I *meeting* giornalieri permettono al project manager di avere misure dello stato del progetto con più frequenza, rispetto a altri modelli di sviluppo, così da intervenire più rapidamente alla necessità di correzioni.

Un vantaggio del modello *Scrum*, e in generale dei modelli agili, è quello di poter vedere il risultato del proprio lavoro più in fretta rispetto ai metodi tradizionali: i *daily scrum* servono anche a incentivare gli sviluppatori e a fornire loro una sensazione di progresso, che, invece, viene persa se i tempi tra un aggiornamento e l'altro si dilatano.

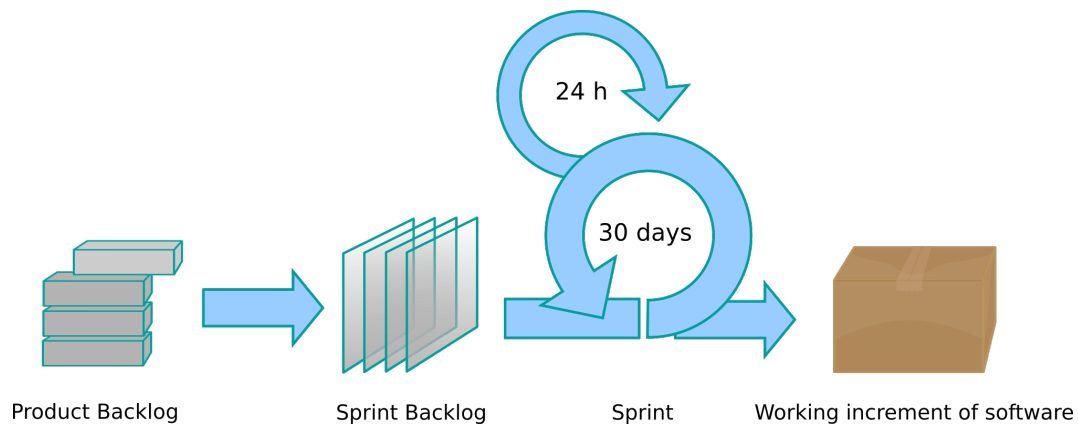


Figura 1.2: Ciclo di vita di Scrum
Source: Wikimedia Commons, Lakeworks, CC BY-SA 3.0

Un ulteriore punto di forza di *Scrum* è il legame di cooperazione che si forma tra il fornitore e il cliente: questo si sente parte del team ed è più propenso a offrire e a ricevere opinioni costruttive, con minori impuntamenti e risultati migliori per entrambe le parti.

Trattandosi di un modello *Agile* la documentazione è molto più ridotta rispetto ai metodi tradizionali: nasce il concetto di user story, un documento che descrive le richieste del cliente e le decisioni prese assieme a quest'ultimo sul progetto durante incontro faccia a faccia. Il vantaggio principale di questo tipo di documentazione è la snellezza dei documenti, sia quando devono essere consultati, sia quando devono essere scritti. Avere una visione chiara di ciò che il cliente vuole può essere difficile se è necessario scorrere decine di pagine di verbali per ottenere tali informazioni; così, al contrario, è sufficiente controllare le ultime decisioni prese.

Il coordinamento del lavoro viene gestito tramite fogli di calcolo con funzioni automatiche, condivisi all'interno del team. Per ogni *task* è segnalato il livello di avanzamento, che deve essere aggiornato da colui a cui è stato assegnato, riportando il tempo impiegato ed eventuali note.

Gli stati in cui un *task* si può trovare sono i seguenti:

- **Analysis:** il *task* richiede analisi
- **Pending:** il *task* è definito ed è in attesa di essere svolto
- **Blocked:** il *task* è bloccato a causa delle sue dipendenze
- **Development:** il *task* è in svolgimento
- **Testing:** il prodotto è in fase di test
- **Reworking:** lo sviluppo è fallito e sta venendo rieseguito
- **Refactoring:** il codice prodotto è in fase di pulizia
- **Completed:** lo sviluppo è completato
- **Confirmed:** il *task* è stato validato

Il sistema di tracking del tempo impegnato da ciascun *task* aiuta il project manager a valutare lo stato del progetto, confrontandolo con le stime fatte a preventivo.

1.2.2 Progetti importanti

VisionHealthCare

VisionHealthCare è un software prodotto da Vision Lab Apps in collaborazione con Dedalus S.p.a¹, società leader nazionale nel software clinico sanitario. L'applicazione, legata a OrmaWeb, suite applicativa web di Dedalus S.p.a, sfrutta gli occhiali per la realtà aumentata di Google, i Google Glass, per automatizzare e semplificare ogni fase del percorso chirurgico, dalla lista d'attesa alla gestione del blocco operatorio, fino alla produzione del registro operatorio e la redazione della cartella anestesiologicala pre e intraoperatoria.

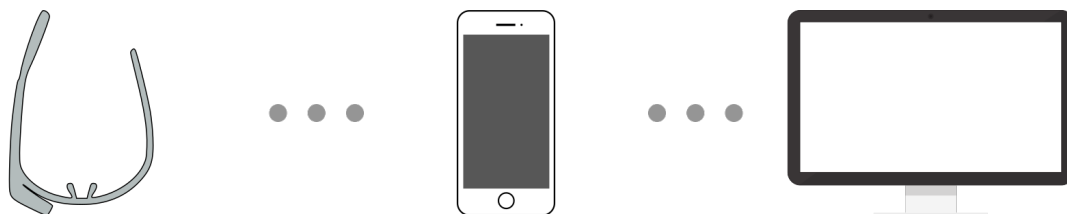


Figura 1.3: Schema di funzionamento di VisionHealthCare

I Google Glass si interfacciano con un'applicazione installata in uno smartphone e si collegano tramite questo ai servizi di OrmaWeb. Gli occhiali permettono di registrare note vocali correlate da video e foto, utili alla documentazione dell'operazione. Il sistema permette di automatizzare buona parte delle procedure di verbalizzazione dell'intervento, trascrivendo il testo registrato e aggiungendolo ai dati salvati su OrmaWeb. Un ulteriore utilizzo dei dati registrati è quello educativo: spesso l'unica persona in sala operatoria ad avere un buon punto di vista sull'operazione è il chirurgo che la sta praticando, ma questo non ha la possibilità di reggere una videocamera. Una soluzione di questo tipo permette di lavorare con le mani libere e allo stesso tempo di ricevere dati aggiuntivi sullo stato del paziente, come il suo battito cardiaco o la quantità di ossigeno nel sangue.

NapkinForever — Paperworld 2017

Vision Lab Apps sta collaborando con NapkinForever², azienda italiana di penne e stilo di design, per realizzare una presentazione virtuale dell'impresa per il Paperworld 2017, la più grande fiera al mondo di prodotti per gli uffici e strumenti di scrittura. Il progetto consiste in una simulazione realizzata tramite l'utilizzo dei Google Cardboard, gli occhiali per la realtà virtuale di Google, che accompagnerà i visitatori nel mondo del design di NapkinForever e presenterà loro i prodotti dell'azienda.

¹Sito web di Dedalus S.p.a: www.dedalus.eu

²Sito web di NapkinForever: www.napkinforever.com

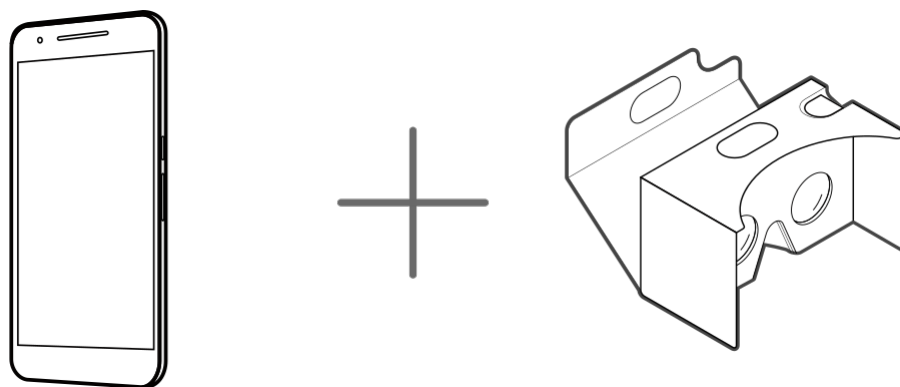


Figura 1.4: Schema di funzionamento di Google Cardboard

I Google Cardboard consistono in un apparato di lenti, da applicare allo schermo di uno smartphone, e di un telaio in cartone. L'utilizzo di hardware comune e di materiali poveri permette di mantenere il prezzo del dispositivo molto basso rispetto ai competitor, pur fornendo una buona esperienza d'uso. La simulazione permetterà di visualizzare i prodotti proposti dall'azienda in scenografie ad hoc e di ottenere informazioni contestuali su di essi.

1.2.3 Premi e certificazioni

Unicredit Start Lab



Figura 1.5: Logo di Unicredit Start Lab

Vision Lab Apps ha partecipato alla competizione tra startup Unicredit Start Lab³ 2017, durante la quale le aziende partecipanti hanno proposto i propri progetti innovativi nei campi "Digital", "Clean Tech" e "Innovative Made in Italy". L'azienda si è classificata tra i 10 finalisti, ottenendo un periodo di incubazione e accelerazione da parte di Unicredit a partire da Settembre 2017.

1.3 Tecnologie utilizzate dall'azienda

L'azienda fa uso di un gran numero di tecnologie durante le proprie attività; di seguito analizzerò le più utilizzate.

1.3.1 Rackspace

Rackspace è un cloud provider che offre servizi di managed cloud computing, basati su Virtual Private Server (VPS) e altri servizi cloud, come Amazon Web Services (AWS), Microsoft Azure e OpenStack. Questo tipo di servizio permette di gestire facilmente servizi cloud utilizzati, mantenendo il pieno controllo di costi e infrastrutture, senza la necessità di conoscere a fondo ogni componente utilizzato.

³Sito web Unicredit Start Lab: www.unicreditstartlab.eu

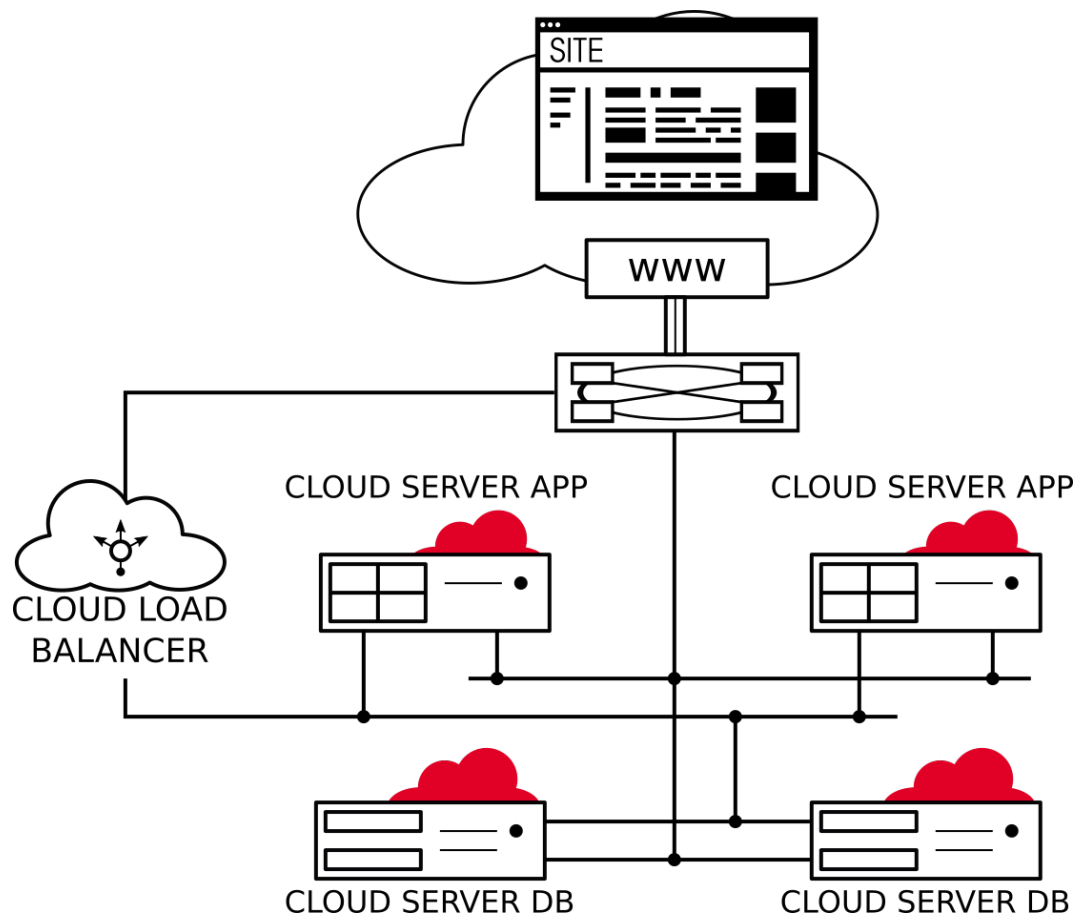


Figura 1.6: Schema di rete generale di un'applicazione su Rackspace

Rackspace permette di gestire in modo semplice nodi per il load balancing e la ridondanza dei servizi. In questo modo è possibile garantire up-time estremamente elevati e distribuire gli aggiornamenti sui singoli nodi, senza mai fermare il servizio completamente.

Vision Lab Apps usa Rackspace come hosting provider nel caso di progetti complessi, quando è necessaria una completa gestione delle risorse.

1.3.2 Firebase

Firebase è una piattaforma di sviluppo per applicazioni Web e mobile, parte di Google Cloud Platform; fornisce servizi di scambio di messaggi e basi di dati in tempo reale, spazio di archiviazione, sistemi di autenticazione, web hosting e test automatici per applicazioni Android. La piattaforma fornisce anche un servizio di analisi e profilazione degli utenti e l'integrazione con il sistema di annunci pubblicitari di Google, AdMob.

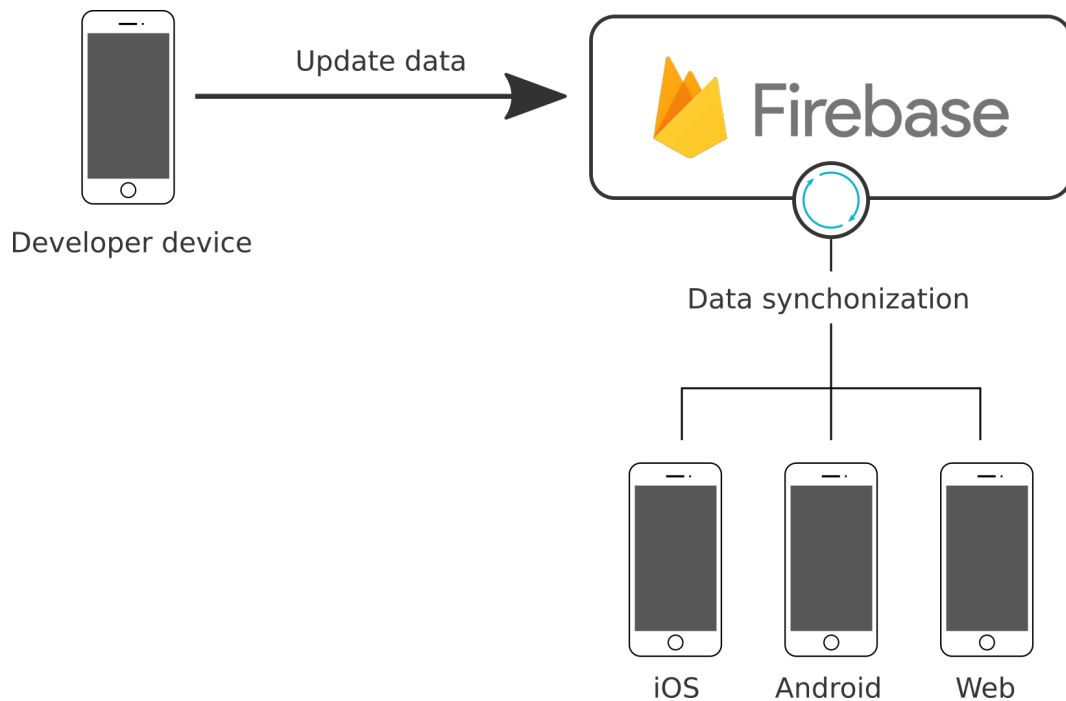


Figura 1.7: Usecase generale di Firebase

Il caso d'uso principale di Firebase è quello di base di dati per la sincronizzazione di dati tra dispositivi, anche su piattaforme diverse, in tempi molto ridotti. A differenza di un database non relazionale comune, il servizio che Firebase offre si basa su una CDN molto estesa, che permette di ridurre i tempi di attesa per la sincronizzazione dei dati.

Vision Lab Apps utilizza Firebase quando necessita della creazione di un ambiente di sviluppo completo, veloce e facile da mantenere.

1.3.3 Java

Java è un linguaggio di programmazione ad alto livello orientato agli oggetti pensato per essere il più possibile indipendente dalla piattaforma sulla quale viene eseguito. Java supera questo ostacolo utilizzando una macchina virtuale, la Java Virtual Machine (JVM), che permette di astrarre il sistema sottostante. Il vantaggio di Java sui linguaggi compilati tradizionali è proprio quello di poter essere eseguito su una qualsiasi piattaforma, a patto che esista una JVM per questa.

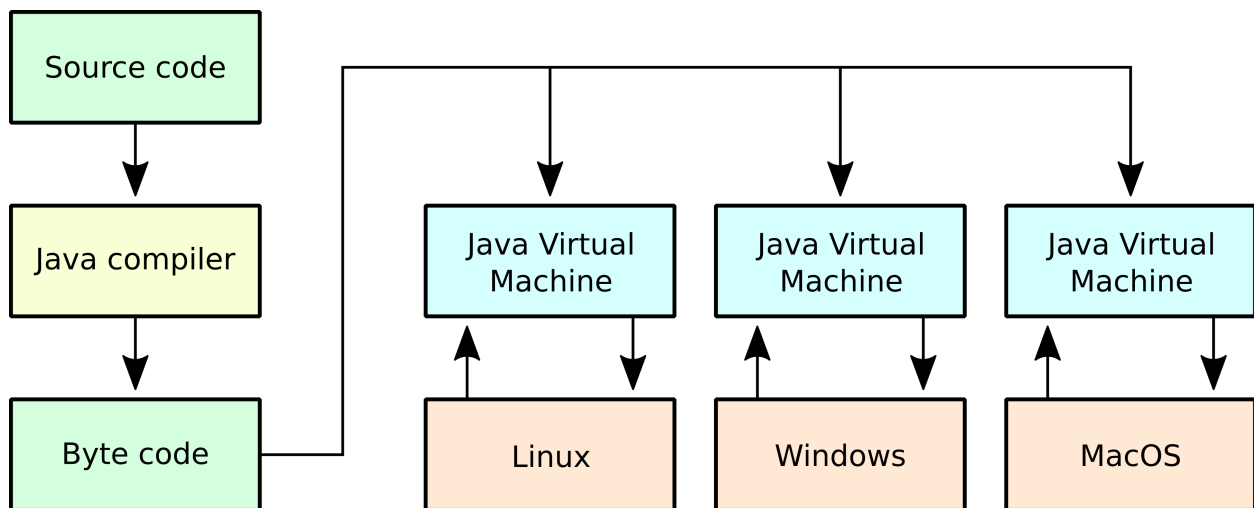


Figura 1.8: Compilazione di Java e utilizzo su più piattaforme

Tra le tecnologie utilizzate da Vision Lab Apps troviamo Android, fortemente basato su Java, e utilizzato per la creazione di applicazioni per dispositivi mobile. Molti dei progetti passati dell'azienda sono legati ad applicazioni Android, ma Vision Lab Apps utilizza Java anche nel caso di servizi web ad alto parallelismo.

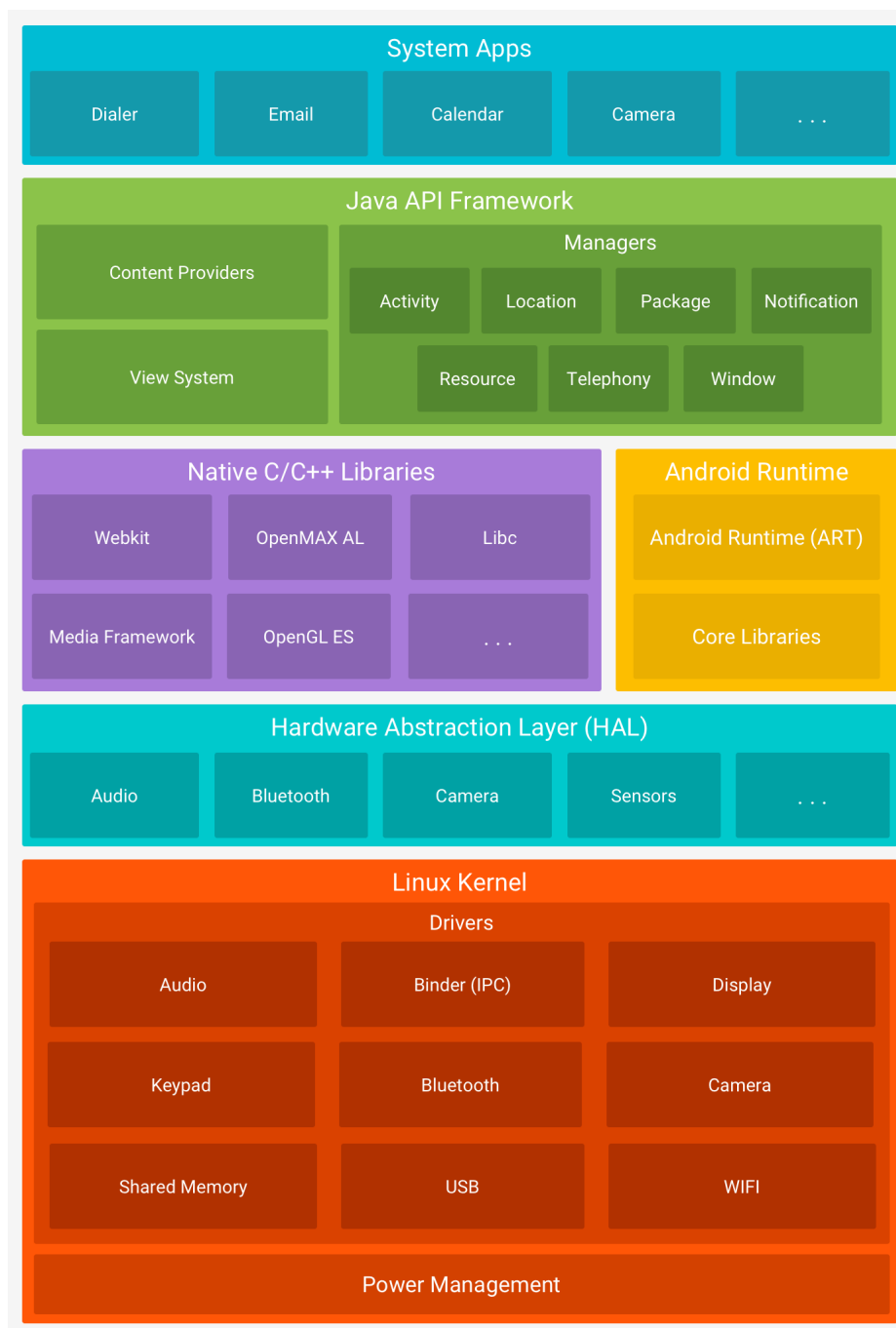


Figura 1.9: Architettura di Android
Source: Documentazione Android Developers

Android consiste di una versione minimale del kernel Linux, completo di driver specializzati per l'hardware del dispositivo sul quale verrà installato. Al di sopra del kernel si trova un layer di astrazione dell'hardware. Questo layer permette agli strati superiori di astrarre l'hardware sottostante. Il layer superiore contiene librerie native in C o C++, altamente efficienti, e il runtime Android, l'equivalente della JVM in Java, ma specializzato per l'esecuzione su dispositivi mobile e fortemente integrato con le librerie e l'hardware sottostante. Gli strati superiori sono, infine un'API per l'accesso alle risorse del sistema e le applicazioni. Queste sono racchiuse in contenitori e le autorizzazioni

di queste possono essere gestite singolarmente.

1.3.4 Git e Bitbucket

Vision Lab Apps utilizza Git come CVS per il versionamento del codice: Git è in grado di gestire progetti anche molto complessi in modo efficiente. Il suo sistema completamente distribuito permette a due persone di lavorare contemporaneamente sullo stesso file, senza necessità di una connessione di rete, e di conservare copie sicure del prodotto in luoghi separati, pur garantendone la consistenza.

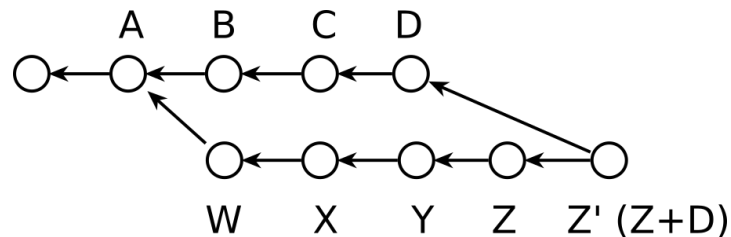


Figura 1.10: Esempio di grafo di lavoro in Git

Source: Wikimedia Commons, Bunyk, CC BY-SA 4.0

Nell'esempio in Fig. 1.10 due sviluppatori hanno lavorato in parallelo in un repository Git, ciascuno in un branch separato, dando origine ad alcuni commit (i nodi A, B, C, D e W, X, Y, Z). Successivamente è stato eseguito un merge, un'unione tra i due branch, che ha generato il nodo Z'. Nel caso di conflitti tra le righe di codice scritte o modificate, Git è in grado di valutare quali sono i *chunk* di codice da controllare e lascerà agli sviluppatori il compito di risolverli.

Per facilitare la gestione del codice e automatizzare alcune attività, l'azienda ha scelto di utilizzare Bitbucket come hoster per le proprie repository. Bitbucket integra il servizio di pipeline, che permette di eseguire degli script in ambienti virtualizzati basati su Docker; in questo modo sono stati automatizzati i test di unità e integrazione e i controlli della quality assurance. Questo tipo di operazioni fanno risparmiare tempo, dato che non necessitano dell'intervento umano, inoltre la garanzia che ogni commit al repository è stato testato conferisce la sicurezza di poter rilasciare una nuova versione senza riserbo.

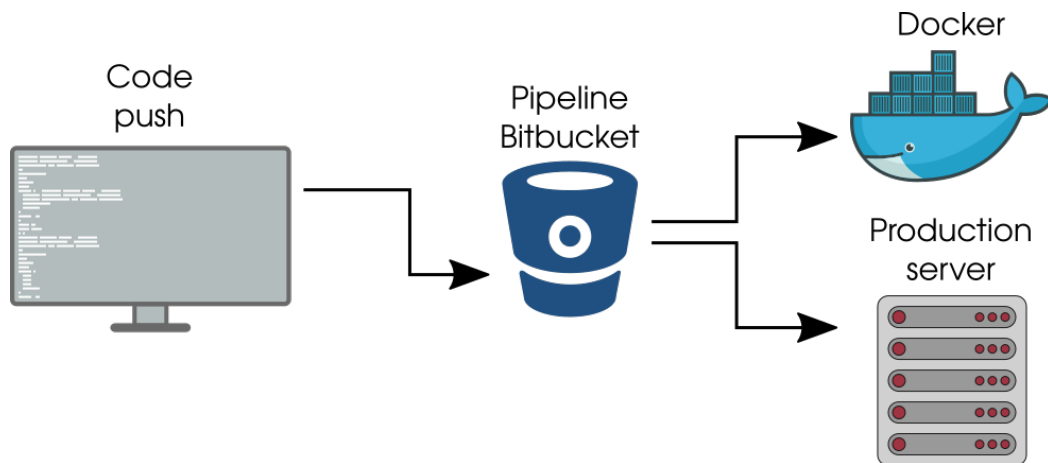


Figura 1.11: Schema generale di una pipeline in Bitbucket

La configurazione tipica di una pipeline su Bitbucket segue il seguente iter:

1. Uno sviluppatore carica sul server Bitbucket del codice, tramite un push di Git;
2. Il server Bitbucket carica il codice in un contenitore Docker, secondo la configurazione del repository;
3. Il contenitore esegue la configurazione dell'applicazione e lancia tutti i test, restituendone i risultati al server;
4. Se i test vengono superati il commit viene ritenuto valido, altrimenti può essere scartato;
5. Se il codice è stato caricato su un ramo di release, il nuovo commit viene caricato su un nuovo contenitore Docker, che si occuperà della creazione di una build del prodotto;
6. Lo stesso Docker può essere configurato in modo tale da caricare il prodotto compilato sui server di produzione, oppure avvisare un certo gruppo di persone di eseguire ulteriori test sulla build ottenuta.

In caso di fallimento di uno dei task della pipeline, lo sviluppatore che ha caricato il codice viene avvisato degli errori e gli vengono forniti i log delle operazioni eseguite.

1.3.5 G Suite

G Suite, la soluzione per l'ufficio di Google, offre una gestione completa di mail commerciali, editor di testo, fogli di calcolo, calendario e archivio di dati; il tutto tramite una semplice interfaccia web.



Figura 1.12: I prodotti di G Suite

Tra i prodotti più utilizzati di G Suite si notano Drive, il servizio di storage; Docs, Spreadsheet e Slides, rispettivamente per documenti di testo, fogli di calcolo e presentazioni; Gmail, per la gestione delle mail aziendali. G Suite include anche un servizio per la gestione di contatti, calendari e un servizio di video chat.

Vision Lab Apps usa questo servizio per le proprie attività, soprattutto per il vantaggio di poter accedere ai dati salvati anche in mobilità, con la massima comodità.

1.3.6 WordPress

WordPress è Content Management System (CMS) open-source che offre una piattaforma editoriale personale; nato per gestire semplici blog, viene utilizzato come framework di sviluppo di siti molto più complessi, sfruttando il sistema a plugin su cui è basato. L'utilizzo di WordPress come base di un sito permette di iniziare a lavorare con un framework riutilizzabile, stabile e aggiornato che ne

gestisce i contenuti e i dati, permettendo allo sviluppatore di concentrarsi sulla loro presentazione all'utente.

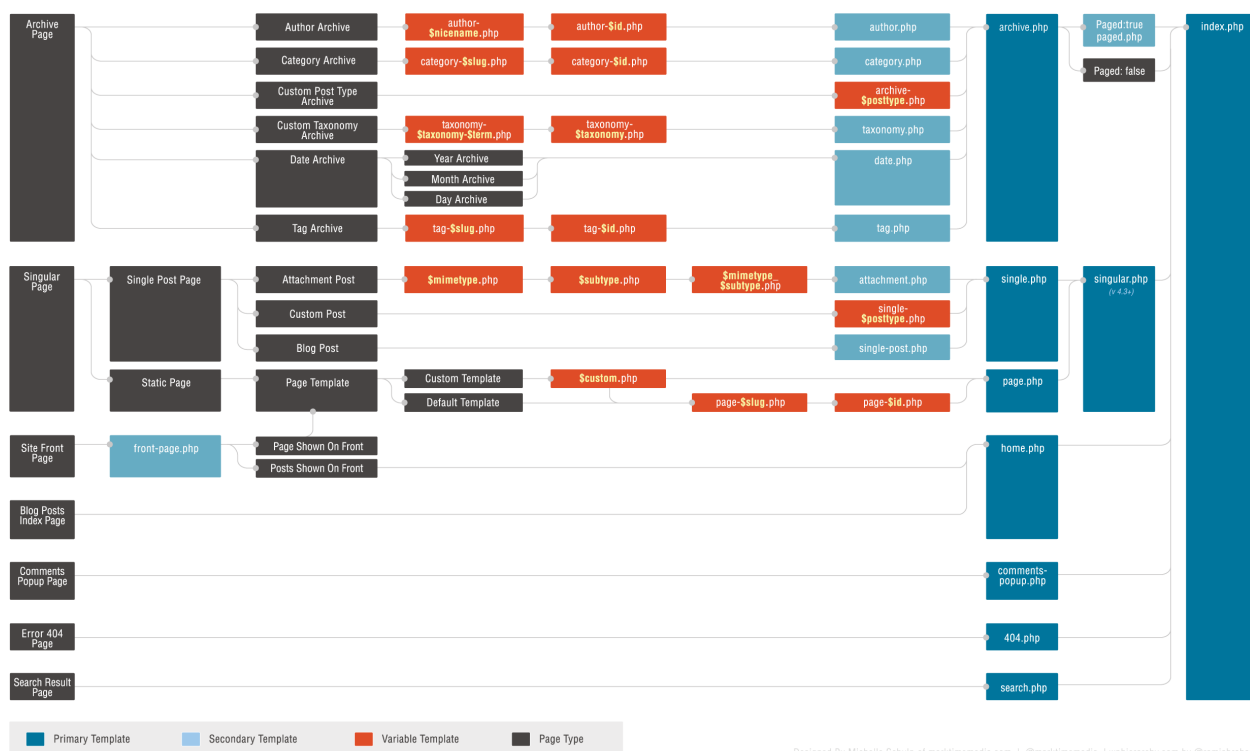


Figura 1.13: Architettura di una pagina WordPress e gerarchia delle pagine
Source: WordPress Developer Documentation

WordPress organizza i contenuti come pagine o articoli; predispone un archivio per organizzarli e un sistema di ricerca basato sui testi e sui metadati legati. La home del sito ha il compito di mostrare i contenuti più recenti o più importanti del sito e permette di scorrere tutti gli articoli come una vetrina.

Vision Lab Apps sfrutta WordPress come base dei propri siti anche per rendere la modifica dei contenuti semplice al proprio cliente.

1.4 Rapporto con l'innovazione

Vision Lab Apps è da sempre alla continua ricerca di nuove tecnologie da conoscere e integrare nei propri prodotti, anche in campi sperimentali, come i dispositivi wearable, IoT e la realtà aumentata. Proprio questi ultimi hanno dato origine ad alcuni dei progetti più all'avanguardia dell'azienda e l'hanno spinto all'acquisizione di personale dedito alla sperimentazione di nuove soluzioni.

Un'ulteriore necessità di innovazione deriva dal settore nel quale Vision Lab Apps si propone: il mercato è in rapida crescita e questo impone un continuo aggiornamento delle conoscenze e delle tecniche per mantenere i propri prodotti validi e restare al passo con i competitor.

Testimonianza di questo continuo aggiornamento è la migrazione verso uno sviluppo cloud based di molti dei prodotti dell'azienda, che ha portato a una riduzione dei costi di manutenzione e a un maggiore controllo sulla disponibilità dei servizi.

L'azienda, inoltre, organizza seminari periodici e laboratori per informare ed aggiornare i propri componenti sulle ultime frontiere della tecnologia, in ambito di sviluppo e marketing.

La proposta di nuove tecnologie è libera all'interno dell'azienda e, se ritenute utili per progetti futuri, viene predisposto un piccolo progetto di prova. In questo modo si riescono a ottenere dati concreti sui vantaggi e gli svantaggi che possono offrire.

2 Scelta dello stage e rapporto con l'azienda

2.1 Lo stage per l'azienda

2.1.1 Necessità dell'azienda

Vision Lab Apps sta sviluppando un sistema di videoconferenza per assistenza remota da applicare ai lavori specialistici e all'interno di aziende manifatturiere. Il sistema è pensato per aiutare un lavoratore inesperto, in situazioni difficili, facendolo guidare da una persona con le conoscenze adeguate a svolgere tali mansioni. Per rendere l'esperienza pratica funzionale, l'azienda ha pensato di utilizzare dei visori per la realtà aumentata, concentrandosi particolarmente sui Google Glass. L'utente esperto dovrà essere in grado di vedere in tempo reale quello che l'altro vede, tramite una videocamera integrata negli occhiali, e di mostrargli dati ed indicazioni su quello che deve fare, tramite il display integrato. Per realizzare tale progetto, Vision Lab Apps necessita di un'intera piattaforma di streaming, che sta realizzando a componenti nel corso del tempo.

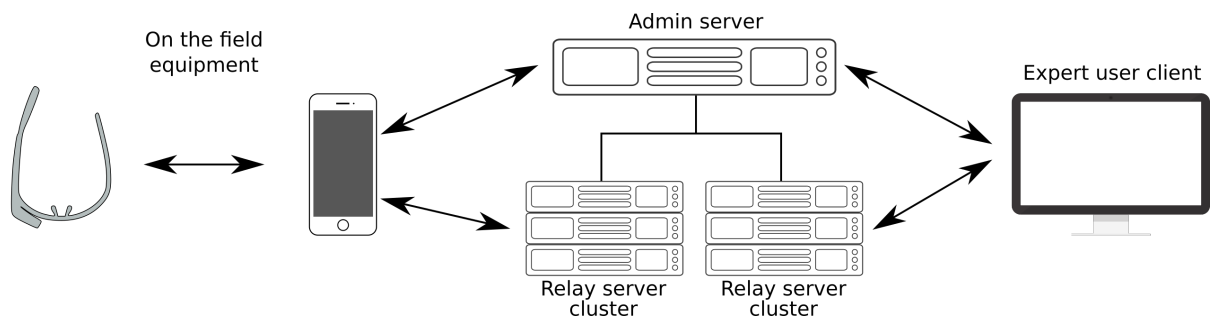


Figura 2.1: Schema generale del funzionamento della piattaforma di streaming

Il sistema che l'azienda vuole costruire è composto da tre elementi fondamentali, il client dell'utente sul campo, il sistema di relay e il client dell'utente esperto. Il primo è realizzato con uno smartphone Android e un paio di Google Glass; permetterà di registrare audio e video, inviati al sistema di relay tramite la rete del telefono, e di ricevere audio, video o messaggi di testo, inviati dal secondo client. Il client dell'utente esperto deve permettere di visualizzare e ascoltare i dati ricevuti e di poter rispondere con dati simili, per indicare al primo utente le azioni da compiere. Infine, il sistema di relay è composta da due elementi, un cluster di server di relay e un server amministratore; il primo è quello che si occupa del reinvio dei messaggi e della continuità della trasmissione tra i client connessi, mentre il secondo è adibito alla gestione dei canali, dell'autenticazione degli utenti e del bilanciamento del carico tra i nodi di relay.

Vision Lab Apps ha già realizzato un prototipo di client Android del servizio e, dopo test di trasmissione interni al dispositivo, si sta preparando per il passaggio alla comunicazione tra due dispositivi connessi ad una rete locale. Successivamente l'azienda provvederà a creare un sistema di amministrazione sfruttando Firebase e il suo servizio di autenticazione sicura.

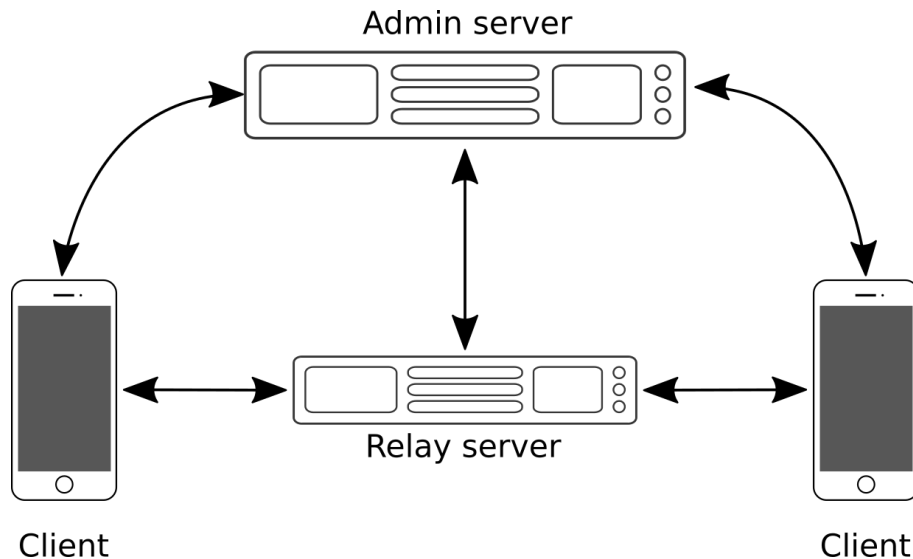


Figura 2.2: Schema delle componenti in fase di sviluppo

L'Obiettivo dello stage è quello di sviluppare il software del server di relay, necessario per far comunicare i due client. Il server deve permettere ai due dispositivi di inviarsi messaggi di qualsiasi tipo, senza che uno conosca l'indirizzo di rete dell'altro, e di gestire i canali e gli utenti tramite un API amministratore.

2.1.2 Risultati degli stage precedenti e seguito degli stagisti nell'azienda

Vision Lab Apps ha deciso anche quest'anno di partecipare all'evento "StageIt", organizzato da Confindustria Padova in collaborazione con l'Università degli Studi di Padova, e di proporre agli studenti un tirocinio interno all'azienda. L'impresa è alla ricerca di neolaureati per arricchire il proprio team di sviluppatori, dato il recente aumento di clienti e la conseguente espansione. Vision Lab Apps è, in particolare, interessata a studenti che sono appassionati di nuove tecnologie e che hanno interesse a imparare nuove tecniche e a farne conoscere di nuove all'azienda stessa. L'impresa ha già organizzato tirocini con altri studenti negli anni precedenti, ottenuto risultati soddisfacenti, tanto che molti degli ex stagisti sono stati assunti dall'azienda.

2.2 Rapporto con il mio stage e con l'azienda

2.2.1 Ambiti di interesse

Al momento della ricerca di uno stage ho prestato particolare attenzione alle aziende che proponevano un percorso legato ai miei interessi di studio. In particolare cercavo tirocini il cui argomento fosse compreso tra i seguenti:

- Sicurezza;
- Sistemi ad alta concorrenza;
- Dispositivi IoT;
- Sistemi virtualizzati;
- Servizi cloud;

- DevOps;
- Sistemi multimediali.

2.2.2 Proposte di stage ricevute

Nei giorni immediatamente seguenti all'evento StageIt sono stato contattato da alcune aziende presenti delle quali ho selezionato le proposte che più mi parevano interessanti.

Uno dei progetti proposti consisteva in un sistema di controllo di risorse e consumi di sistemi virtualizzati tramite Docker: il software doveva fornire una chiara visione dello stato di ciascun servizio e riportare eventuali anomalie. Lo stage mi avrebbe permesso di conoscere meglio l'utilizzo di Docker, specialmente in un contesto DevOps, e di imparare nuove tecnologie di gestione di gruppi di contenitori, in particolare Kubernetes; fondamentali in un contesto di continuous deployment e continuous release. Le conoscenze che mi avrebbe fornito questo tirocinio erano di mio grande interesse, ma, sfortunatamente, non sono stato scelto, tra i possibili candidati.

Un altro stage riguardava la realizzazione di un software in grado di unificare la grande mole di dati dell'azienda, sparsa tra diversi sistemi aziendali legacy e i CMS dei loro clienti. Il prodotto avrebbe dovuto raccogliere i dati, salvarli in un formato comune, facilmente accessibile, e aggiornare i sistemi in caso di modifiche. L'utilità di un software del genere è molto elevata per un'azienda, ma il prodotto in sé consiste in un certo numero di adattatori per ciascuna delle fonti di dati, e non mi avrebbe fornito particolari conoscenze aggiuntive, rispetto a quelle che già possedevo.

Un altro progetto proposto, invece, prevedeva la realizzazione di un sistema per la gestione delle traduzioni dei testi di un catalogo prodotti, consentendo visualizzazione, modifica e la ricerca di testi ripetuti tramite Elasticsearch, per l'ottimizzazione delle spese di traduzione. Elasticsearch è un motore di analisi del testo il cui utilizzo si sta diffondendo molto in fretta, ma lo stage non comprendeva lo studio del suo funzionamento. Il prodotto avrebbe anche dovuto generare una serie di informazioni, come un preventivo dei costi di traduzione e una lista di frequenza di certe espressioni.

Un ulteriore tirocinio prevedeva un progetto sperimentale per lo spostamento di un software di rendering CAD per TAC da un sistema locale a uno client-server, con elaborazione dei dati su server virtualizzati. Il video elaborato sarebbe poi stato servito a un thin client; alleggerendolo del carico di computazione del render. Il progetto comportava la scomposizione del software proprietario dell'azienda, lo studio di una soluzione di virtualizzazione e l'integrazione con una libreria per la trasmissione dei dati. Sebbene lo stage proposto toccasse molti e vari ambiti, si sarebbe concentrato solo in una parte del progetto, prevedendo la continuazione da parte dello studente dopo la laurea. Considerata la mia scelta di continuare i miei studi, non ho potuto accettare la proposta dell'azienda.

2.2.3 Scelta dello stage

Al momento della scelta di quale stage accettare, tra quelli proposti, ho preferito optare per quello che proponeva argomenti per me più nuovi e meno conosciuti, che producesse, quindi, il migliore valore aggiunto per mie competenze. Ho scelto il progetto di Vision Lab Apps perché ho trovato il campo di cui si occupa interessante e le mie conoscenze sull'argomento erano solo marginali. Inoltre una più approfondita conoscenza di sistemi ad alta concorrenza, come può essere un servizio di streaming, è applicabile a molti altri campi, come sistemi cloud distribuiti e dispositivi IoT.

2.2.4 Scelta dell'azienda

Durante la scelta dello stage ho considerato marginale l'aspetto del futuro in azienda, dato che la mia scelta di continuare a studiare per la laurea magistrale è incompatibile con un lavoro a tempo

pieno. Il mio interesse più grande era quello di poter collaborare con persone più esperte di me per imparare cose nuove; per questo motivo mi sono accertato che durante il tirocinio avrei potuto interagire con molte figure dell'azienda che si occupano di sviluppo.

Un altro importante fattore che ho deciso di ignorare è stata la distanza dell'azienda dalla mia residenza: ho preferito dare più importanza all'esperienza dello stage in sé rispetto alla comodità di spostamento.

2.3 Obiettivi del progetto di tirocinio

All'inizio del progetto di tirocinio sono stati definiti gli obiettivi, distinti poi in obbligatori e desiderabili, e i vincoli tecnologici ai quali ho dovuto attenermi. Ne segue una lista dei fondamentali.

2.3.1 Obiettivi obbligatori

- Studio dei formati video e dei protocolli di rete per le trasmissioni video in real-time e on-demand;
- Studio dell'architettura di rete di un servizio di streaming;
- Sviluppo di un applicativo server per il relay di messaggi tra i suoi client.

2.3.2 Obiettivi desiderabili

- Studio delle problematiche della trasmissione di dati in mobilità;
- Sistema di autenticazione dei client e organizzazione a canali delle trasmissioni;
- Studio di possibili utilizzi della tecnologia Blockchain nel campo dello streaming.

2.3.3 Vincoli tecnologici

Mi è stato richiesto di utilizzare Java come linguaggio di programmazione, per consentire una più veloce integrazione con il client Android. Inoltre, data la struttura a servizi della piattaforma, ho dovuto utilizzare un server Java come base del prodotto.

2.4 Pianificazione del lavoro

La pianificazione del progetto è stata eseguita in accordo con il tutor interno. Nella prima settimana ho avuto modo di studiare gli strumenti, i formati e i protocolli necessari alle funzioni della piattaforma, stilando una relazione sullo stato dell'arte. Ho, poi, proseguito con l'analisi delle funzionalità richieste e la definizione di requisiti e casi d'uso. Ho impiegato la terza settimana nella progettazione del servizio e della componente server, per poi procedere le due settimane successive alla sua realizzazione. Per garantire una buona qualità del codice, ho dedicato una settimana alla validazione, ai beta test e alla riformattazione. L'ultima settimana ho ultimato la documentazione del progetto e dei risultati ottenuti.

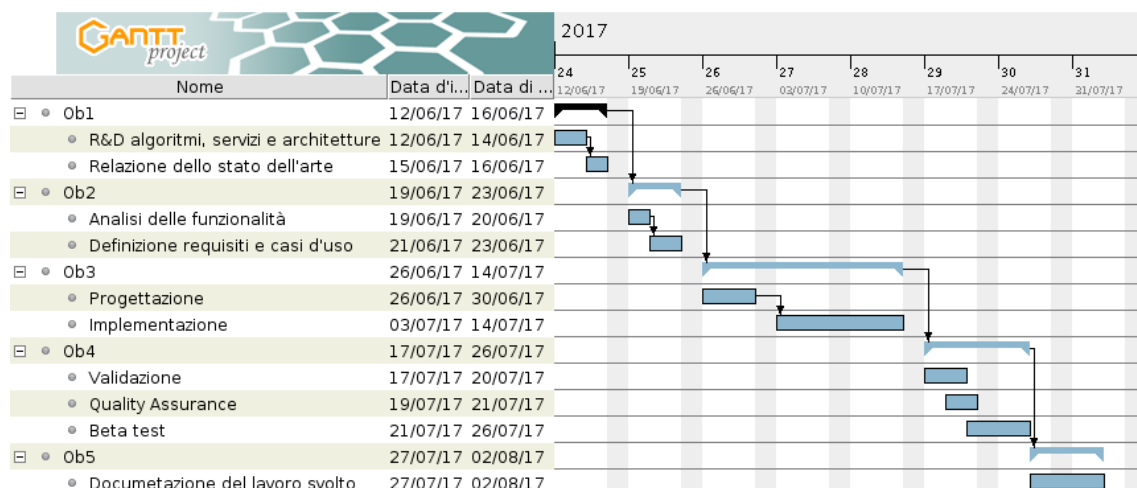


Figura 2.3: Diagramma di Gantt della pianificazione

2.4.1 Strumenti utilizzati

Per ottenere buoni risultati durante la pianificazione Vision Lab Apps utilizza GanttProject¹, un software open-source per la realizzazione di diagrammi di Gantt e PERT. Il programma permette di costruire diagrammi con estrema facilità, gestendo scadenze, risorse, personale e dipendenze; inoltre permette di esportare il risultato in Hypertext Markup Language (HTML) o in formato Portable Network Graphics (PNG).

¹Sito web del progetto GanttProject: www.ganttproject.biz

3 Il prodotto

3.1 Acquisizione delle conoscenze settoriali

3.1.1 Codifica video

Un video digitale è definito come la codifica numerica di un segnale video; la codifica è, dunque, l'azione di trasformare un segnale video in un formato digitale. Questa operazione è effettuata da un software o da un dispositivo elettronico detto codec. Generalmente, i codec eseguono anche compressione lossy, ovvero con perdita di informazioni, in modo tale da ridurre i dati necessari per trasmettere o salvare i flussi video. Esistono anche codec che mantengono inalterata la quantità di informazione; questi vengono definiti lossless.

Esistono due famiglie di codec, quelli intraframe e quelli interframe: i primi descrivono i frame di un video singolarmente, trattandoli come immagini statiche; i secondi, invece, descrivono i cambiamenti che occorrono tra un fotogramma e l'altro, partendo da frame chiave descritti con codifica intraframe. I codec intraframe risultano, quindi più adatti alla descrizione di scene molto movimentate, senza perdita di qualità, mentre quelli interframe sono più adatti nel caso di sequenze per lo più statiche, per la loro notevole efficienza nel descrivere i pochi cambiamenti avvenuti.

3.1.2 Formati video comunemente usati

M-JPEG

Motion Joint Photographic Experts Group (JPEG) è un codec video che comprime ogni frame del video originale in una immagine in formato JPEG, un comune formato di compressione con perdita per immagini digitali. Originariamente creato per applicazioni multimediali, M-JPEG è attualmente utilizzato da dispositivi di videoregistrazione come camere digitali, IPcam e webcam.

Un grande vantaggio dell'utilizzo di M-JPEG per la codifica video, che ha spinto la sua diffusione sulla maggior parte delle prime fotocamere digitali non professionali, è quello della bassa potenza di calcolo necessaria al suo utilizzo: è sufficiente una modifica software all'encoder hardware per JPEG per poter creare un codec M-JPEG. Inoltre, permette la lettura non lineare del file, utile nel caso di sistemi di video editing. Inoltre l'encoding intraframe che sfrutta limita l'informazione contenuta in ciascun frame M-JPEG a quella di un frame del video originale, permettendo di cambiare velocemente il contenuto, senza considerare i frame precedenti o successivi, come invece accade nelle codifiche interframe come H.264/MPEG-4 AVC.

Con l'accrescere della potenza di calcolo, M-JPEG è stato soppiantato da MPEG-4, per la resa qualitativamente molto migliore a parità di bitrate, infatti JPEG è inefficiente nello spazio di archiviazione. Inoltre M-JPEG non sfrutta tecniche di predizione spaziale, come H.264/MPEG-4 AVC, che permetterebbero un ulteriore risparmio di spazio, a discapito di una maggiore potenza di calcolo necessaria.

MPEG-1

MPEG-1 è uno standard per la compressione con perdita di video e audio progettato per comprimere video con la qualità variabile tra il video di una VHS e l'audio di un Compact Disc (CD) fino a 1.5Mbit/s senza perdita di qualità eccessive, permettendo la creazione di video CD, trasmissioni

TV via satellite e via cavo e DAB. Attualmente, MPEG-1 è il formato lossy con più supporto di compatibilità al mondo e uno degli standard che ha introdotto più noti è stato il formato audio MP3.

MPEG-1 introduce molte tecnologie, frutto di studi statistici, che gli permettono di risparmiare molti dati per descrivere lo stesso video con poca perdita di qualità: innanzitutto l'utilizzo della trasformata discreta del coseno su blocchi di 8×8 permette di ottenere coefficienti tra loro incorrelati e solo alcuni di questi sono dominanti, permettendo un alto livello di compressione. I coefficienti Discrete Cosine Transform (DCT) ottenuti vengono quantizzati, con una grana più fine nelle frequenze più basse e con una più grossa nelle frequenze più alte. Queste influiscono meno sul risultato finale e il loro annullamento permette di diminuire il bitrate complessivo senza pesanti perdite di qualità. Data la grande quantità di zeri dovuti alla quantizzazione, si utilizza una codifica run-length, ovvero si indicano i valori a coppie (a, b), dove a rappresenta il valore di un coefficiente non nullo e b il numero di zeri che lo precedono. Si sfrutta infine una codifica entropica basata su una tabella di valori standardizzati, ottenuti con un approccio basato sulla codifica di Huffman.

MPEG-4

MPEG-4 è basato sugli standard MPEG-1, MPEG-2 e QuickTime. Si è osservato che, in caso di video con sezioni statiche o relativamente statiche, molti frame sono riproducibili dai precedenti. È stata, quindi, realizzata una tecnica che sfrutta la somiglianza tra frame vicini per risparmiare spazio nella codifica. Questa si ottiene indicando alcuni frame come frame chiave (I-Frame) e generando i frame seguenti come trasformazioni del frame principale.

MPEG-4 permette di creare oggetti multimediali con migliori capacità di adattamento e flessibilità, in grado di migliorare la qualità del risultato finale; inoltre è in grado di adattare la propria qualità sia a stream a basso bitrate, anche 1 Mbit/s, fino a formati ad alta risoluzione, come 4K e 8K.

Le sue ottime performance di qualità e compressione costano in potenza computazionale, a causa della complessità della fase di quantizzazione; al contrario, la decodifica per la riproduzione è sufficientemente rapida e poco costosa, grazie anche a decodificatori hardware specializzati, ormai comunemente integrati nella maggior parte dei processori.

WebM

WebM è un formato video royalty-free pensato per il web, rilasciato sotto licenza Berkeley Software Distribution (BSD), il cui sviluppo è sponsorizzato da Google. WebM sfrutta il motore di codifica VP9 e audio Opus ed è supportato nativamente dai maggiori browser, inclusi dispositivi mobile. WebM punta ad una migliore efficienza di compressione rispetto a MPEG-4 e sta sostituendo Graphics Interchange Format (GIF) come formato di animazione video. Mentre il formato è libero, i motori VP8 e VP9 sono patentati Google e solo nel 2013 Moving Picture Experts Group (MPEG) LA ha raggiunto un accordo con la multinazionale per la licenza delle componenti essenziali all'implementazione dei codec. Le attuali implementazioni libere (libvpx) mostrano un significativo vantaggio nei tempi di codifica e nel risparmio di bitrate rispetto a MPEG-4 H.264 e H.265.

3.1.3 Protocolli

Un protocollo di rete è un protocollo di comunicazione utilizzato da in una rete informatica: la definizione formale a priori delle modalità di interazione tra due o più apparecchiature elettroniche devono utilizzare per poter comunicare tra di loro tramite una rete.

Protocolli per il video streaming

Quando parliamo di protocolli di rete possiamo dividerli due categorie in base al tipo di trasmissione che utilizzano, ovvero se stream-oriented o message-oriented. Questa differenza, riscontrata al Transport Layer della pila Open Systems Interconnection (OSI), è la base dei due più famosi protocolli di quel livello: TCP e UDP.

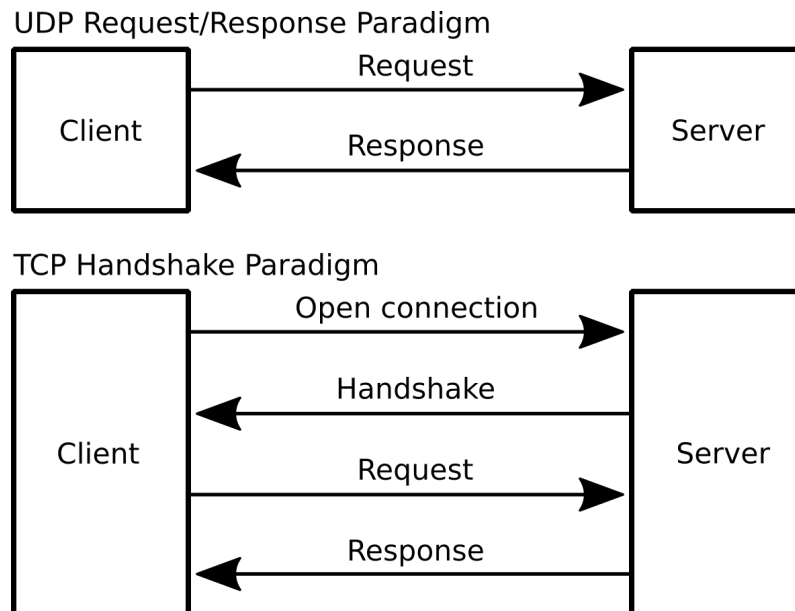


Figura 3.1: Schema di connessione di TCP e UDP

Adattato da: Wikimedia commons, Khandarmaa, CC BY-SA

TCP (Transmission Control Protocol) appartiene alla prima categoria: provvede alla realizzazione di una connessione affidabile, nella quale i dati vengono suddivisi in pacchetti ordinati e in caso di errori di trasmissione il ricevente può richiederne il reinvio. Questo protocollo è pensato per la consistenza dei dati e assicura che le informazioni richieste arrivino tutte, integre e nell'ordine corretto al ricevente.

UDP (User Datagram Protocol), al contrario, appartiene al secondo genere: utilizza un modello connectionless, pensato per messaggi atomici, e non garantisce che l'ordine di invio di un certo numero di pacchetti sia lo stesso con il quale vengono ricevuti. Inoltre, il protocollo non ha particolari misure di prevenzione della corruzione dei dati, se non un checksum dei contenuti del pacchetto, che ne permette la verifica di integrità.

Nel caso di applicazioni di streaming è importante nominare anche il protocollo SCTP (Stream Control Transmission Protocol): si tratta di un protocollo message-oriented e connectionless, simile a UDP, ma che aggiunge alcune feature di TCP, come l'ordinamento dei pacchetti e la richiesta di reinvio. Questo permette al ricevente di mantenere la coerenza dei dati, anche in caso di messaggi lunghi, e di ricevere più stream di pacchetti in parallelo.

Tipologie di streaming

Nel caso applicativo dello streaming video si riscontrano due possibili situazioni: nel caso di streaming real-time l'obiettivo è quello di trasmettere un video con una latenza molto bassa, anche a discapito della qualità video; si pensi, ad esempio, quanto è negativa l'esperienza di un utente che

durante una videoconferenza si accorge che un altro utente deve aspettare del tempo prima di ricevere la propria registrazione.

Altro caso è quello dello streaming on-demand, nel quale un utente richiede l'accesso ad una risorsa video remota e la sua visualizzazione deve essere riportata con la qualità nativa; in questo caso l'utente è disposto ad aspettare qualche secondo di precaricamento iniziale, ma risulta particolarmente infastidito dalle interruzioni, magari a causa del buffering.

Nel primo caso il protocollo ideale è quello che trasmette con il bitrate più alto possibile e con la massima frequenza di invio di messaggi; infatti il solo bitrate non basta, una frequenza di invio alta permette di limitare la latenza alla sorgente del segnale, rimpicciolendo il tempo di attesa tra un intervallo e il successivo. Per questo tipo di trasmissioni il protocollo più adatto è UDP, per la dimensione variabile del messaggio, la piccola dimensione del suo header e l'assenza di garanzie di consistenza non fondamentali, come la certezza che tutti i dati siano stati ricevuti. Sono nati quindi numerosi protocolli per l'Application Layer OSI basati su UDP, adattati alla trasmissione di streaming video, come Real-time Transport Protocol (RTP), Real Time Streaming Protocol (RTSP), Real Time Messaging Protocol (RTMP). A questo tipo di protocolli vengono spesso associati protocolli di controllo, come Real Time Message Control Protocol (RTMCP) e Realtek Remote Control Protocol (RRCP), che permettono a trasmittente e ricevente di accordarsi sul formato dei dati e sul bitrate da utilizzare.

Nel secondo caso il protocollo deve garantire la consistenza e l'integrità della trasmissione, pur mantenendo un bitrate elevato. Questo tipo di trasmissione può essere ottenuta tramite un protocollo stream-oriented, come quello di TCP. Nascono, quindi, anche nel caso di TCP protocolli per l'Application Layer OSI progettati per stream di video, come MPEG-DASH (Dynamic Adaptive Streaming over HyperText Transfer Protocol (HTTP)), HLS (HTTP Live Streaming) di Apple e Microsoft Smooth Streaming. Per risolvere il problema delle interruzioni, molti servizi lasciano al client la possibilità di caricare dinamicamente più di una versione dello stesso contenuto, in base alla disponibilità di bandwidth.

Esiste infine un'ulteriore funzionalità che sta diventando comune nei servizi più grandi: quella dello streaming ibrido. Il servizio si basa su streaming real-time, ma permette agli utenti di rivedere una scena già trasmessa, comportandosi come uno streaming on-demand. Questo tipo di servizio richiede che il contenuto registrato venga salvato e velocemente diffuso all'interno della piattaforma, per poi essere reso disponibile, come per i restanti contenuti on-demand.

UDP e i problemi di firewall

Sebbene i protocolli basati su UDP siano particolarmente adatti alle comunicazioni real-time, soffrono di un grave problema legato alle regole applicate ai firewall, specialmente nel caso di reti pubbliche o aziendali: capita molto spesso che per evitare minacce provenienti da reti esterne gli amministratori decidano di bloccare tutti, o quasi, i pacchetti UDP in entrata, a meno di risposta ad una chiamata proveniente dall'interno. Questa pratica è diventata molto comune, tanto che anche servizi di streaming, come YouTube e Twitch, o di telecomunicazione, come Skype o Hangouts, siano stati costretti ad incapsulare il contenuto dei propri pacchetti UDP in pacchetti TCP, per superare le protezioni e offrire i propri servizi.

WebRTC

WebRTC è un insieme di protocolli di rete che permettono l'invio di messaggi in real-time tramite connessioni peer-to-peer. Il sistema è pensato per essere integrato nativamente nei browser, in modo tale da poter essere utilizzato, tramite un'interfaccia, da webapp apposite per comunicare con componenti di backend e browser di altri utenti. WebRTC sfrutta il protocollo RTP, per il trasferimento di audio e video, e lo stato attuale del suo supporto da parte dei principali browser

è quasi totale: solo vecchie versioni di Internet Explorer e Safari non lo supportano. Sebbene questa tecnologia sia standardizzata e il suo impiego sia sempre più frequente da parte di servizi di videochat, le sue implementazioni per le piattaforme Android e iOS sono ancora acerbe e poco documentate; per questo motivo è ancora comune definire un protocollo di comunicazione specifico per l'applicazione, piuttosto di utilizzare questo standard.

3.1.4 Architettura di una piattaforma di streaming

Struttura di massima

Una piattaforma di video streaming si compone di cinque elementi principali:

- La rete di inbound, ovvero il sistema di reti che gestisce l'ingresso di dati nella piattaforma, siano questi file video o stream;
- Il motore di codifica, che permette di ricodificare i video in ingresso per renderli disponibili nei formati opportuni ai passaggi successivi.
- Il sistema di storage, per il salvataggio dei contenuti per la breve, media e lunga conservazione;
- Il sistema di gestione e ricerca dei contenuti, che permette agli utenti di caricare, cercare e riprodurre i contenuti di proprio interesse;
- Il sistema di distribuzione dei contenuti, ovvero la rete che si occupa della trasmissione di dati ai client.

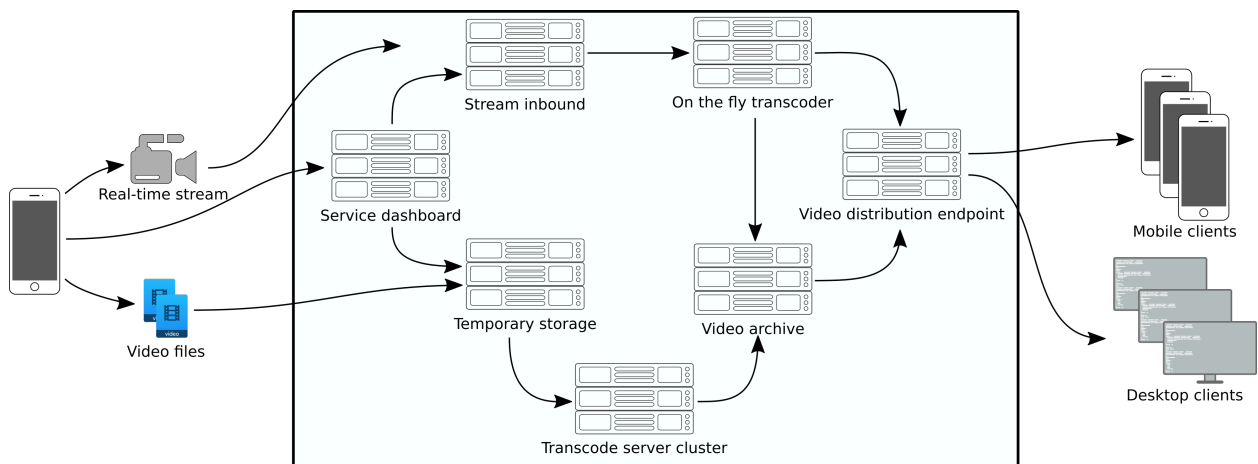


Figura 3.2: Schema generale di una piattaforma di streaming

Inbound e transcodifica

La rete di inbound è la parte del sistema che si occupa di accettare file e stream da parte degli utenti e di inoltrarli ai nodi sottostanti. Questa componente è soggetta ai tipici problemi delle applicazioni web con un numero di utenti rilevante, ovvero la stabilità del servizio, la necessità di reti ad alta disponibilità, il bilanciamento del carico di lavoro tra i nodi sottostanti.

I contenuti caricati tramite il sistema di inbound vengono, poi, inviati ai motori di codifica, componenti specializzati nell'encoding dei video. A seconda del tipo di input è possibile scegliere se utilizzare un transcodificatore per lo streaming, in grado di rielaborare il formato video di uno stream "al volo" e con poca latenza aggiuntiva, oppure, nel caso di file video, questi vengono caricati in storage temporanei e successivamente elaborati da transcodificatori comuni.

Storage e organizzazione dei contenuti

Il sistema di storage si occupa dell'organizzazione dei contenuti, del loro salvataggio e del loro recupero. Al semplice filesystem viene associato un database, spesso non relazionale, per la gestione di metadati, testi, commenti e dati aggiuntivi. Il sistema deve permettere una veloce ed efficace ricerca dei contenuti, per permettere agli utenti di accedere alle informazioni volute.

Outbound, protocolli e CDN

Nel caso della distribuzione di contenuti verso i client sono generalmente utilizzati protocolli basati su TCP, come MPEG-DASH, Apple HLS e Microsoft Smooth Streaming. Questo tipo di protocolli permettono più stream paralleli e la possibilità di eseguire caching dei contenuti trasmessi, particolarmente utili nel caso di utilizzo di CDN per estendere la distribuzione. Queste reti, solitamente di proprietà delle aziende di telecomunicazione su cui poggiano gli Internet Service Provider (ISP), offrono un servizio di caching che permette di spostare il carico di rete dovuto all'accesso ai contenuti dai server principali del servizio a server più piccoli e dislocati sul territorio. Questo tipo di distribuzione, non solo diminuisce il carico di rete, limitato quindi alla sola autorizzazione all'accesso, ma permette di avere latenza e tempi di caricamento minori da parte degli utenti.

Message relay

Esistono casi di servizi di streaming che devono permettere il reinvio di dati tra due client, senza alcuna modifica ai contenuti trasmessi; in questo caso si parla di message relay. Questo tipo di servizio è fondamentale se i due client non possono comunicare direttamente, magari perché bloccati da firewall o nascosti da una rete con Network Address Translation (NAT).

Servizi annessi

Molte piattaforme di streaming non si limitano alla sola trasmissione di contenuti ma offrono anche un certo numero di servizi annessi. In particolare le informazioni legate alla demografia degli utenti e alla loro profilazione sono di particolare interesse per i creatori. Inoltre sono comuni servizi di monetizzazione e annunci pubblicitari, cifratura dei contenuti e sistemi Digital Rights Management (DRM).

3.1.5 Trasmissione dei contenuti in mobilità

La quantità di utenti che consumano contenuti multimediali su applicazioni mobile sempre più in aumento, tanto che nel Novembre 2016 si è registrato il sorpasso della quantità di utenti su tali piattaforme, rispetto ai desktop. È in crescita anche l'utilizzo di questi dispositivi per eseguire live stream, specialmente legati a social network, come Twitter, Facebook e Google+. L'utilizzo di dispositivi mobile aggiunge un ulteriore strato di complessità alla comunicazione con i servizi web, come anche le piattaforme di streaming. Le difficoltà maggiori che si incontrano in questo campo sono la limitata potenza computazionale dei dispositivi e autonomia energetica, i limiti imposti da una rete senza fili e la grande frammentazione dei sistemi, specialmente quando si tratta di Android. La maggior parte dei problemi precedentemente citati viene gestito dal sistema operativo, ma restano le limitazioni fisiche, ovvero la velocità di trasferimento dei dati:

3.1.6 Reti per dispositivi mobile

Le principali reti disponibili per dispositivi mobile possono essere riassunte nelle seguenti:

4G — Long Term Evolution (LTE)

LTE, lo standard commerciale 4G per le telecomunicazioni mobile, supporta downlink con velocità di picco di 300 Mbit/s e uplink di 75 Mbit/s in caso di posizione statica. Questo tipo di connessione è ampiamente sufficiente alla trasmissione di video in alta risoluzione e alto framerate. LTE ha lo svantaggio di essere soggetto a forti interferenze quando deve attraversare materiali solidi come muri o persone.

Wi-Fi

L'ultimo standard Wi-Fi, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) 802.11ac, ormai comunemente supportato dai dispositivi mobile in commercio, raggiunge una velocità di trasmissione di circa un Gbit/s. Il precedente standard, IEEE 802.11n, era limitato a 300 Mbit/s tramite l'utilizzo di sistemi ad antenna multipla. Anche Wi-Fi è soggetto ad interferenze, specialmente quando utilizzato sulle frequenze più alte, a 5GHz. Oltre alla comune connessione a infrastruttura, IEEE 802.11 supporta anche connessioni peer-to-peer tramite il protocollo Wi-Fi Direct, che riduce i consumi e massimizza il throughput.

Bluetooth

Bluetooth 5 ha un throughput molto più basso dei precedenti canali di comunicazione; raggiunge, infatti, circa 50 Mbit/s, un bitrate appena sufficiente alla trasmissione di video HD, al contrario, però, la distanza tra il trasmittente e il ricevente è molto più ridotto. Il vantaggio principale di Bluetooth è quello di utilizzare una minore quantità di energia elettrica per comunicare con altri dispositivi.

3.2 Nuovi orizzonti

Tra gli obiettivi desiderabili indicati dall'azienda sono presenti lo studio di alcuni campi innovativi e la possibilità di utilizzarli nel contesto dello streaming video.

3.2.1 Blockchain

Blockchain è una tecnologia che permette di rendere delle informazioni pubbliche virtualmente impossibili da alterare. Il sistema si basa su catene di nodi distribuite in una rete peer-to-peer; ogni nodo contiene una certa quantità di informazioni fissata, un numero intero variabile, detto nonce, e l'hash dell'ultimo nodo della catena.

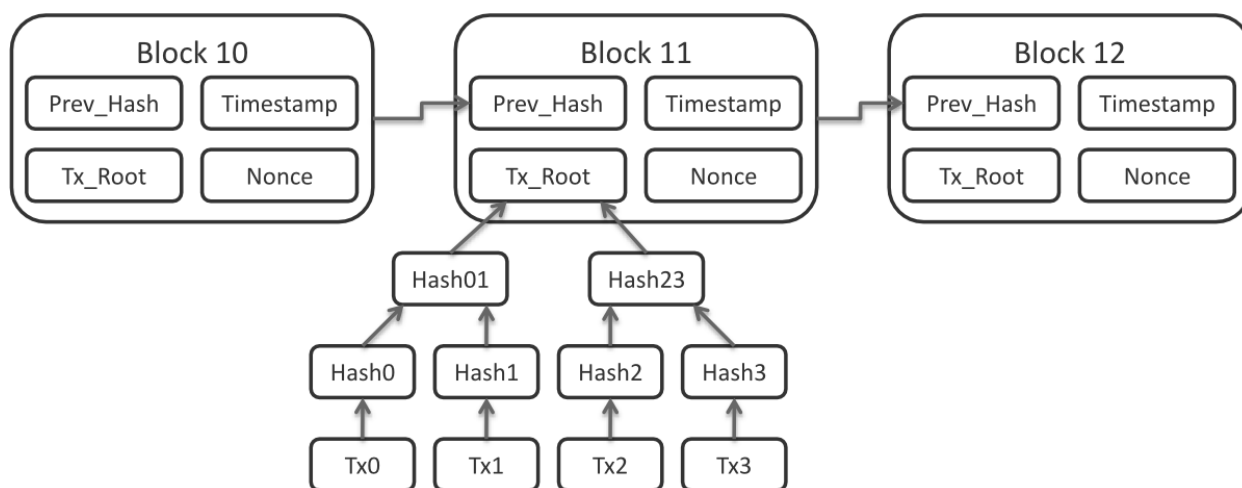


Figura 3.3: Schema di funzionamento di una blockchain

Source: Wikimedia commons, Matthäus Wander, CC BY-SA 3.0

Tutte le informazioni contenute nella catena sono pubblicamente accessibili e vengono condivise tra i client che sono connessi alla rete. La catena può essere estesa con nuovi nodi, ma affinché un nodo sia valido il suo hash deve soddisfare una regola nota a tutti i client. In generale questa impone che un certo numero di cifre in posizione fissata dell'hash siano uguali tra di loro e l'unico modo per far variare il risultato è cambiare il valore del numero intero all'interno dei dati. Dato che una funzione di hash è difficilmente reversibile, ovvero non è possibile ottenere i dati in input della funzione partendo dall'output, la complessità di questa operazione è molto alta e con l'aumentare del numero di cifre diventa sempre più difficile trovare un valore corretto. La regola della complessità varia in funzione del tempo necessario alla comunità di utenti per generare un nodo: con lo sviluppo di hardware in grado di eseguire le operazioni necessarie più velocemente, il sistema si adatterà rendendo più difficile la generazione. Quando un client riesce a generare un nodo adatto trasmette i valori adatti a dei server detti beacon, che accertano la correttezza del risultato e marcano l'istante temporale in cui il nodo è ritenuto valido, condividendo l'informazione a tutti i client vicini. Questi inizieranno a lavorare sul prossimo nodo della catena, mentre l'utente che ha scoperto il nodo ottiene dei vantaggi: ad esempio, nel caso di Bitcoin guadagna una ricompensa economica. In qualsiasi momento è possibile convalidare la creazione dei nodi precedenti applicando la funzione di hash su un nodo; inoltre tanto più la catena di nodi si allunga, tanto più è improbabile che qualcuno sia riuscito ad alterare l'intera sequenza, dato che questo richiederebbe l'aver trovato i valori corretti per generare ogni nodo in essa.

La possibilità di rendere alcuni dati pubblici immodificabili può essere molto utile in molti campi, ma nel caso dello streaming affronta dei limiti molto importanti: mentre potrebbe essere possibile salvare interi file video all'interno di un singolo nodo, il throughput di questo metodo è molto basso a causa del tempo necessario al *mining* del nuovo blocco. Si pensi che il tempo medio di generazione di un nodo di Bitcoin si aggira intorno agli otto minuti e trenta secondi. Un altro punto critico è il motivo che dovrebbe spingere gli utenti a eseguire le operazioni di hashing, ovvero la ricompensa: nel caso di un sistema di criptovaluta si può guadagnare denaro, ma parlando di streaming video non c'è una ricompensa ovvia. Una soluzione potrebbe essere quella di ottenere crediti per l'utilizzo del servizio, oppure un certo valore monetario; il problema di questo approccio è che potrebbe non essere autocontenuto nella sola piattaforma, limitandone l'efficacia e l'interesse. Esistono, inoltre, soluzioni meno onerose per la condivisione di file video su grande scala in modo decentralizzato, pur mantenendo la consistenza dei dati, come ad esempio il sistema Torrent, che permette di suddividere

delle informazioni in blocchi cifrati univocamente identificati e di condividerli con chiunque ne faccia richiesta; in questo modo è comunque possibile garantire che il contenuto di ciascun blocco non sia stato alterato, senza necessità della complessità aggiunta da una blockchain.

3.2.2 Streaming peer to peer

Un nuovo sistema di distribuzione, particolarmente efficace se accoppiato ad una CDN, è quello di aggiungere al client una componente che permetta la condivisione dei chunk di video scaricati tramite una rete peer-to-peer. Gli utenti connessi diventano così parte della CDN migliorando aumentandone la portata in modo lineare seguendo la crescita della base di utenza.

Esistono già soluzioni commerciali che adottano questo tipo di soluzione, ottenendo una grande riduzione del carico di rete sui server adibiti alla distribuzione e, di conseguenza, diminuendo i costi di gestione.

Esistono anche soluzioni interamente peer-to-peer, come quella ideata dagli sviluppatori di WebTorrent¹: il sistema sfrutta la rete BitTorrent e permette di condividere i contenuti man mano che vengono scaricati da altri utenti.

Esistono anche soluzioni peer-to-peer per gli streaming real-time; una di queste è WebRTC: tra le molteplici funzionalità dello standard è inclusa la possibilità di ritrasmettere i contenuti ricevuti agli altri utenti collegati allo stesso stream.

3.3 Analisi delle soluzioni esistenti

Propongo di seguito un'analisi delle più famose soluzioni commerciali di streaming.

3.3.1 YouTube

YouTube utilizza lo standard RTSP (Real Time Streaming Protocol) per l'inbound di stream video real-time, mentre il principale protocollo per la trasmissione è MPEG-DASH; questa scelta permette di ottenere una piattaforma facilmente accessibile, pur perdendo una parte del throughput a causa del protocollo di trasporto. YouTube permette streaming-on demand dei video caricati dagli utenti, inoltre ha integrato il servizio con un sistema live-streaming ibrido nel Settembre del 2016. Attualmente YouTube supporta video filmati con tecnologie 3D e video 360°, integrati con la piattaforma Google Cardboard. Il formato standard utilizzato da YouTube è H.264/MPEG-4 AVC, ma è in corso una migrazione verso il formato VP9.

YouTube associa al suo servizio di streaming una serie di servizi paralleli, come il sistema di monetizzazione di AdMob e di pubblicità AdSense e quello di profilazione e analisi Google Analytics.

3.3.2 Netflix

Netflix è un servizio di streaming on-demand di serie TV e film ad abbonamento. Il sistema utilizza lo standard MPEG-DASH e integra una protezione DRM sui dati inviati. I video, scalati in diverse qualità, vengono spezzati in chunk e richiesti ad uno ad uno dal client; la scelta della qualità da visualizzare viene calcolata in base al tempo necessario per scaricare la precedente.

Netflix si avvale dei servizi cloud di Amazon per soddisfare le richieste in modo scalabile e distribuito; inoltre, ha stipulato accordi con i principali ISP dei paesi in cui il servizio è attivo, per poter sfruttare le CDN locali e migliorare i tempi di risposta e di caricamento dei contenuti.

¹Sito web di WebTorrent: webtorrent.io

3.3.3 Red5 Pro

Red5 Pro è una piattaforma ibrida, che offre servizi di streaming facilmente integrabili con applicazioni e siti. Attualmente i protocolli supportati sono RTMP, RTSP, Real Time Messaging Protocol over HTTP (RTMPT), RTSP, HTTP Live Streaming (HLS), mentre i formati sono FLV e H.264 MP4; inoltre dispone di Software Development Kit (SDK) per Android e iOS. Red5 Pro permette di controllare direttamente il bitrate di outbound dai server e offre i servizi di videochat a due vie o in gruppo. Da poco è stato aggiunto supporto anche a WebRTC.

3.3.4 Contus Vplay

Contus Vplay è una piattaforma di streaming ibrida, basata su AWS. Il sistema sfrutta i servizi Simple Storage Service (S3) e Elastic Transcode di Amazon, per la transcodifica dei file video caricati dagli utenti, e il Wowza Streaming Engine, il motore di transcodifica leader del mercato e che supporta la conversione “al volo”, tramite l'utilizzo di server Elastic Compute Cloud (EC2).

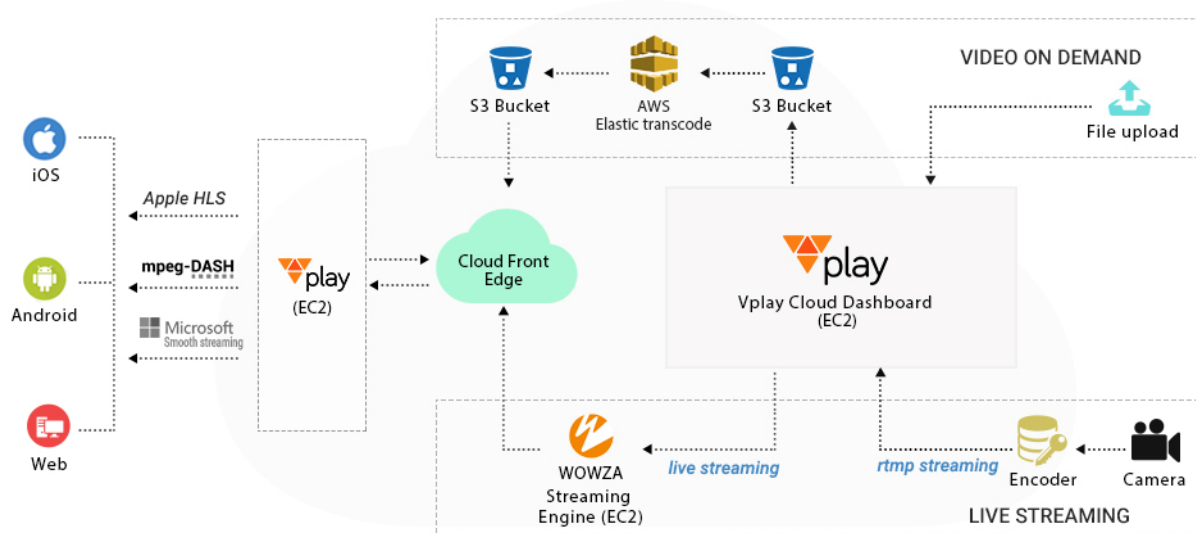


Figura 3.4: Architettura di Contus Vplay

Source: sito web di Contus Vplay www.contus.com/video-on-demand-solution.php

Il servizio è predisposto per soddisfare le richieste dei clienti tramite tre protocolli, Apple HLS, MPEG-DASH e Microsoft Smooth Streaming, sulle principali piattaforme e con multiple qualità del video. La gestione dei contenuti avviene tramite una dashboard che viene mantenuta tramite una combinazione di server EC2 e il servizio CloudFront di AWS. Oltre al sistema di streaming, Contus offre una serie di servizi allegati, come analisi sul traffico, profilazione, monetizzazione sugli annunci pubblicitari, cifratura delle connessioni e SDK per le maggiori piattaforme.

3.3.5 Streamroot

Streamroot offre un servizio di streaming ibrido. La sua particolarità rispetto alle altre soluzioni è quella di utilizzare un sistema di condivisione peer-to-peer dei contenuti scaricati dai clienti. In questo modo ciascun cliente non solo può contare sulla CDN che distribuisce i contenuti, ma anche su ogni altro utente che sta visualizzando gli stessi contenuti. Secondo i dati riportati dal servizio, questo tipo di distribuzione, unita al sistema di CDN, permette di abbassare il carico sui server

di circa il 75%. Streamroot viene utilizzato da molte aziende che hanno necessità di trasmettere ingenti quantità di dati, tra le quali Dailymotion, Eurosport e Canal+.

3.4 Analisi dei requisiti

3.4.1 Analisi preliminare

L'analisi preliminare si è focalizzata sulla definizione degli attori e degli obiettivi e delle funzionalità principali del software da produrre.

Il software deve gestire l'autenticazione di amministratori e utenti; questi hanno, in entrambi i casi, hanno un'identità univoca e un token di accesso. Gli amministratori hanno la possibilità di creare e rimuovere canali, aggiungere e togliere utenti e gestirne l'autenticazione. Gli utenti possono autenticarsi, inviare messaggi nei canali dove sono registrati o abbandonarne uno.

Ho definito, in collaborazione con gli sviluppatori del team che si occupa del progetto, gli attori del sistema, le interazioni che possono intraprendere e i risultati di ciascuna di queste. Per fare ciò ho definito i casi d'uso tramite un diagramma Unified Modeling Language (UML).

3.4.2 Definizione dei casi d'uso

Segue una versione ristretta della definizione dei casi d'uso definiti.

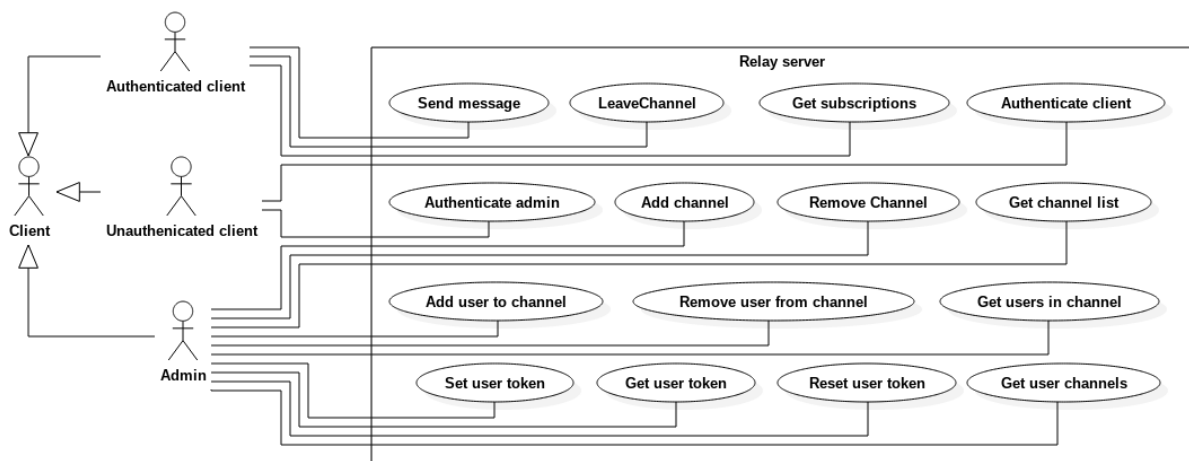


Figura 3.5: Diagramma dei casi d'uso del sistema

Attori

- **Client:** un utente che interagisce con il sistema;
- **Unauthenticated Client:** un client non ancora autenticato;
- **Authenticated Client:** un client che ha eseguito l'autenticazione ed è registrato all'interno di almeno un canale;
- **Admin:** un utente o un sistema automatico che ha il ruolo di amministratore del servizio offerto dal server.

Casi d'uso di Unauthenticated Client

- **Authenticate client:** L'utente esegue l'autenticazione su sistema come client;
- **Authenticate admin:** L'utente esegue l'autenticazione su sistema come admin.

Casi d'uso di Authenticated Client

- **Send message:** L'utente invia un messaggio all'interno di un canale in cui è registrato;
- **Leave channel:** L'utente lascia il canale e viene deregistrato;
- **Get subscriptions:** L'utente ottiene la lista dei canali nei quali è registrato;

Casi d'uso di Admin

- **Add channel:** L'Amministratore crea un nuovo canale;
- **Remove channel:** L'amministratore elimina un canale;
- **Get channel list:** L'amministratore ottiene la lista dei canali registrati;
- **Add user to channel:** L'amministratore registra un utente in un certo canale;
- **Remove user from channel:** L'amministratore rimuove un utente da un canale;
- **Get users in channel:** L'amministratore ottiene la lista degli utenti registrati in un canale;
- **Set user token:** L'amministratore imposta il token di autenticazione di un utente;
- **Get user token:** L'amministratore ottiene il token di autenticazione di un utente;
- **Reset user token:** L'amministratore resetta il token di autenticazione di un utente;
- **Get user channels:** L'amministratore ottiene la lista dei canali in cui un certo utente è registrato.

3.5 Struttura della piattaforma

Una volta definiti i casi d'uso, ho proceduto alla scelta dei protocolli di rete da utilizzare e la progettazione strutturale del sistema.

3.5.1 Protocolli

Ho eseguito la scelta dei protocolli in collaborazione con il team di sviluppatori che lavorava sul client Android, per trovare la migliore soluzione in termini di latenza, throughput e complessità di implementazione.

I protocolli UDP sono stati scartati a causa dei problemi con firewall riportati precedentemente. Le specifiche del servizio richiedono che sia possibile inviare messaggi di qualsiasi tipo, sia atomici, sia stream di dati. Per semplificare l'invio di dati generici, senza essere necessariamente legati ad un certo protocollo dello strato applicativo, abbiamo deciso di utilizzare dei WebSocket ed esistono implementazioni open-source dello standard per la maggior parte delle piattaforme, inclusi iOS e Android e Java, rendendo, quindi, l'implementazione di client e server più semplice.

3.5.2 Diagramma delle classi

Segue in Fig. 3.6 il diagramma UML delle classi semplificato.

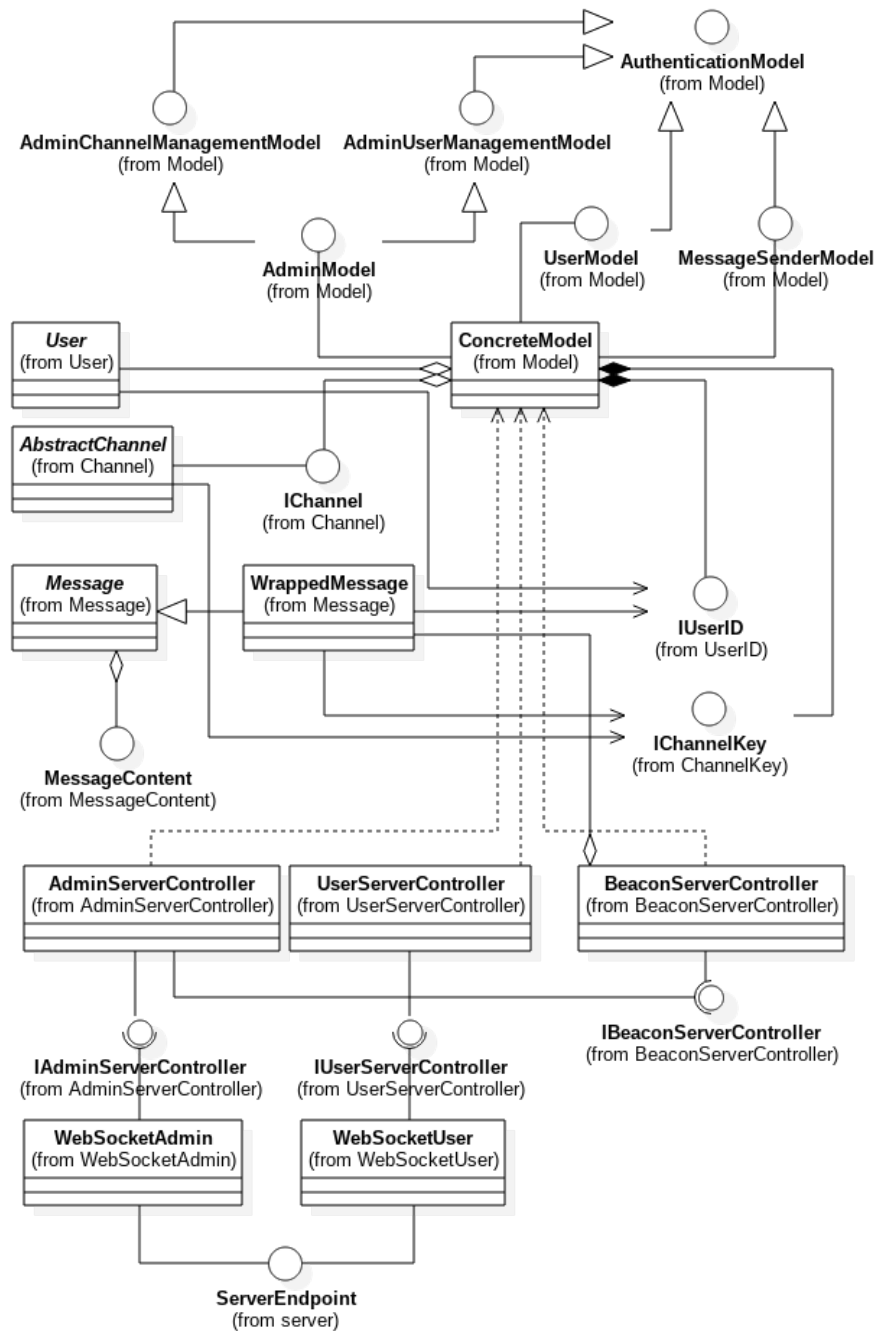


Figura 3.6: Diagramma delle classi del sistema

ConcreteModel e interfacce del modello

Il modello è responsabile del salvataggio e della gestione delle informazioni legate agli utenti, ai canali, alle registrazioni e ai messaggi da inviare. Per organizzare chiaramente le sue funzionalità

ho utilizzato interfacce molto specifiche.

IUserID e IChannelKey

Per identificare univocamente un utente o un canale ho designato due interfacce per due classi di oggetti che permettono di ottenere un identificativo univoco sotto forma di stringa; in questo modo è possibile referenziare uno di questi oggetti indicandone il solo ID.

User

La classe astratta User definisce un utente e permette di caricare ed estrarre informazioni sui profili degli utenti.

IChannel e AbstractChannel

IChannel e AbstractChannel individuano le funzionalità e i dati di base di un canale, come il suo nome e il suo scopo.

Message, WrappedMessage e MessageContent

Message rappresenta un messaggio da inviare, il cui contenuto è un insieme di MessageContent. Al fine di garantire la possibilità di inviare qualsiasi tipo di contenuto tramite un messaggio, MessageContent eredita direttamente dalla classe Java Serializable, ma non impone altri limiti. WrappedMessage aggiunge ad un messaggio le informazioni per spedirlo, ovvero la ChannelKey e l'UserID del destinatario.

Controller di Admin, User e Beacon

I tre controller del sistema sono singleton e gestiscono le interazioni e aggiornano il modello. AdminServerController e UserServerController eseguono, rispettivamente, le azioni ricevute da un amministratore e da un utente. BeaconServerController è incaricato della creazione dei messaggi e del loro invio; utilizza un pattern command e una coda intelligente.

3.6 Tecnologie utilizzate

3.6.1 Linguaggi — Java

Il linguaggio Java è stato scelto innanzitutto per la possibilità di eseguire il codice su qualsiasi piattaforma che offra una JVM; in questo modo il sistema può essere eseguito su server con diversi sistemi operativi senza la necessità di riscriverne componenti o di essere ricompilato. Un altro vantaggio è quello di poter riutilizzare parte del codice scritto nel client Android, riducendone i tempi di sviluppo e aumentando la qualità del codice.

3.6.2 Piattaforma — Apache Tomcat 8

Un servizio Java che espone dei WebSocket ha bisogno di una piattaforma che ne gestisca gli accessi ovvero un componente che implementi la classe JavaServer. Per questo progetto ho deciso di utilizzare Apache Tomcat 8 per il suo supporto nativo ai WebSocket. Inoltre, Tomcat 8 è il server Java open-source più diffuso, la sua documentazione è sufficiente chiara e completa e attualmente è l'unico a supportare completamente l'ultima versione di Java.

3.6.3 Tipo di dati scambiati — JSON vs XML

Per poter inviare messaggi tramite un WebSocket è necessario definire una codifica. L'implementazione standard di Java permette di utilizzare stringhe di byte, stringhe di testo oppure di definire un codificatore e un decodificatore per gestire oggetti più complessi. Per semplificare lo sviluppo della piattaforma ho preferito utilizzare una codifica testuale, che mi permettesse di eseguire test automatici e manuali tramite client testuali. Le due codifiche maggiormente utilizzate che permettono di descrivere oggetti anche molto complessi sono JSON e XML. Entrambe le codifiche soddisfano pienamente i requisiti necessari, ma JSON è molto meno prolisso di XML; per questo motivo ho preferito tale linguaggio.

3.6.4 Strumenti di supporto

Strumenti di codifica

Lo strumento che ho utilizzato per codificare ed eseguire i test sul sistema è stato l'IDE IntelliJ Idea, sviluppato da JetBrains, nella versione open-source "Community Edition". Questo editor, progettato appositamente per Java, è ricco di utili strumenti per velocizzare la codifica e l'analisi, come lo smart code completion, per i suggerimenti contestuali per il completamento del codice, i code template, per la rapida generazione di strutture di codice prestabilite, e sistemi di analisi e di automatizzazione dei task, come l'aggiornamento delle dipendenze o l'esecuzione dei test.

Strumenti di versionamento

Lo strumento di versionamento utilizzato durante il progetto è stato quello comunemente utilizzato dall'azienda, ovvero Git, con l'ausilio dei server di Bitbucket per l'automatizzazione di alcuni test. Il vantaggio di aver utilizzato Git durante lo sviluppo è stato quello di poter condividere velocemente le ultime modifiche con gli altri sviluppatori, pur mantenendo baseline sicure e testate.

Strumenti di test e verifica

Ho scelto di utilizzare il framework JUnit 4 per eseguire test di unità e di integrazione dopo un'attenta analisi delle sue funzionalità. Il sistema di test si è rivelato semplice ed efficace; mi ha permesso di realizzare test significativi con poco sforzo e ha contribuito alla buona qualità del codice. L'integrazione dell'IDE usato con JUnit permette anche di esportare i dati dei test, del coverage e delle analisi in formato HTML, facilmente consultabile anche senza strumenti di sviluppo dedicati. JUnit 4 è stato utile anche per eseguire benchmark per valutare l'efficacia del prodotto, tramite la realizzazione di una simulazione di conversazione tra un numero definito di utenti.

Strumenti di analisi di rete

Durante i test sulla sicurezza delle trasmissioni ho dovuto assicurarmi che il sistema inviasse contenuti sensibili non cifrati; per questo motivo ho avuto necessità di registrare le conversazioni tra alcuni utenti simulati. Per eseguire queste operazioni ho utilizzato Wireshark, un software open-source per l'analisi del traffico di rete. Wireshark permette di effettuare sniffing del traffico di rete, di visualizzare ciascun pacchetto e di filtrare facilmente i contenuti d'interesse. Tramite un'analisi eseguita con questo strumento ho potuto garantire che tutti i dati scambiati fossero cifrati end to end tramite Transport Layer Security (TLS).

Strumenti di continuous integration

Per poter garantire l'indipendenza dalla piattaforma di sviluppo, in particolare durante l'esecuzione dei test, ho utilizzato un sistema Docker. Questo strumento permette di configurare facilmente l'installazione e la configurazione di un software in sviluppo su una macchina virtuale minimale e di eseguire test e script su di essa. Tramite l'integrazione con Bitbucket ho potuto automatizzare queste attività, fornendo una maggiore qualità al codice senza dover svolgere compiti ripetitivi e onerosi in termini di tempo.

Tramite le pipeline, il sistema di configurazione delle operazioni sui container Docker di Bitbucket, ho potuto automatizzare anche il deploy dell'applicazione, limitando i tempi di manutenzione necessari al suo aggiornamento manuale.

3.7 Qualifica

3.7.1 Verifica

la verifica di un prodotto è l'insieme delle operazioni atte a garantirne la qualità e il rispetto delle specifiche definite durante la progettazione. Può essere riassunto nella domanda *“did I build the system right?”*

Analisi statica

L'analisi statica consiste nei test che possono essere eseguiti sul prodotto senza compilare ed eseguire il codice. In questo tipo di test possiamo trovare, quindi, analisi grammaticali del codice, test su errori tipici, test sui file di configurazione, controlli sulla duplicazione del codice, ecc.

L'analisi statica del prodotto è stata delegata ai test interni dell'IDE utilizzato, IntelliJ Idea. Questo esegue molti dei test sopra citati in modo automatico, mentre il codice viene scritto, fornendo utili suggerimenti.

Una funzionalità che mi è sembrata particolarmente utile durante la verifica è il controllo automatico sulle classi importate: l'IDE controlla quali classi importate nel file vengono effettivamente utilizzate, segnala le mancanti offrendo suggerimenti e permette di eliminare quelle non necessarie.

Analisi dinamica

Con analisi dinamica si intendono le operazioni di controllo fatte sul codice compilato ed eseguito. Questi test includono asserzioni sullo stato dell'esecuzione ed esecuzioni controllate dei componenti, sia singolarmente, sia facendoli interagire l'uno con l'altro.

Ho programmato l'analisi dinamica del prodotto durante l'analisi e la progettazione, per poi essere implementata durante la codifica. Ho realizzato i test di unità delle singole componenti e di integrazione, verificando che eseguissero i compiti assegnati dalle interfacce nel modo corretto, per poi passare ai test di sistema, eseguiti tramite simulazioni controllate.

Un vantaggio importante nella scelta di eseguire test di sistema automatici è stata quella di poter valutare il prodotto nella sua interezza, generando un report chiaro sullo stato di sviluppo e sulle prestazioni ottenute. In particolare, dopo una prima fase di codifica ho scoperto un errore sulla gestione di alcuni task da parte del componente dedicato al reinvio dei messaggi proprio grazie a un test di questo tipo; alcuni messaggi non venivano inviati e le sessioni stabilite con i client venivano chiuse anticipatamente se il numero di utenti superava una certa soglia. La simulazione ha evidenziato questo problema e mi ha permesso di individuare e correggere il bug in poco tempo.

3.7.2 Validazione

La validazione di un prodotto consiste nel controllare che tutti i requisiti del prodotto vengano effettivamente soddisfatti e può essere riassunta nella domanda “*did I build the right system?*”

Validazione interna

Dato che il prodotto è destinato ad essere un componente di una più grande piattaforma, ancora in sviluppo, la validazione è stata interna. Il project manager e il mio tutor aziendale hanno eseguito tutti i test, le simulazioni e, come prova finale, hanno provato a comunicare tramite due client WebSocket.

Bibliografia