Distributed Systems & Big Data

Relazione Homework 1

Descrizione applicazione

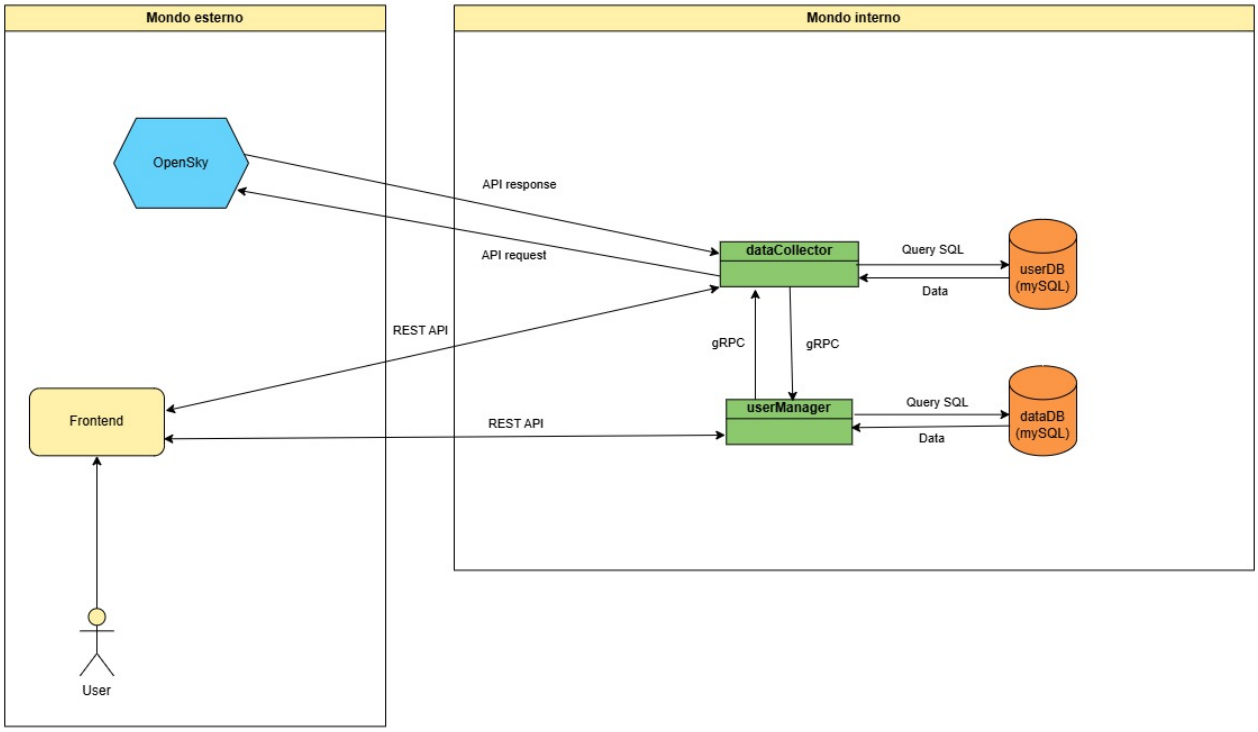
L'applicazione si presenta come un sistema distribuito composto da due servizi principali interni – User Manager e Data Collector – e da uno esterno, OpenSky.
Gli utenti possono registrarsi all'applicazione per cercare gli aeroporti di loro interesse e visualizzare i voli più recenti ad essi associati.

Le informazioni sugli aeroporti e sui voli vengono recuperate tramite le API di OpenSky e memorizzate dal Data Collector, in modo da rendere le successive consultazioni rapide e indipendenti dal servizio esterno.
Lo User Manager, invece, gestisce tutte le informazioni degli utenti registrati.

Per agevolare il testing, l'applicazione presenta un front-end composto da due pagine HMTL. La Home page consente di effettuare la registrazione, il login, e la cancellazione dell'account. Dopo l'autenticazione, l'utente viene reindirizzato alla Data Collector Page, da cui può testare tutte le funzionalità disponibili, tra cui: aggiungere o rimuovere un aeroporto dalla lista di interesse, visualizzare gli aeroporti aggiunti, consultare i prossimi voli in partenza o in arrivo dagli aeroporti di interesse, calcolare la media dei voli in partenza e in arrivo negli ultimi giorni da un dato aeroporto, e visualizzare l'ultimo volo in partenza e in arrivo da un dato aeroporto.

Il Data Collector aggiorna automaticamente i dati ogni 12 ore tramite un thread separato, così da mantenere il database locale sempre coerente con quanto esposto da OpenSky.

Schema architetturale



Database

Per affrontare questo homework abbiamo iniziato dalla progettazione dei database necessari a memorizzare le informazioni sugli utenti e sui voli.
Abbiamo scelto MySQL come tecnologia di riferimento perché open-source, affidabile e largamente diffusa.

Il primo database, User DB, contiene due tabelle: users, che memorizza i dati degli utenti registrati; request_log, utilizzata per registrare le richieste di registrazione e cancellazione e per implementare la politica at-most-once.
La tabella users include:

- email come chiave primaria;
- username, soggetto a vincolo unique;
- password, salvata tramite hashing bcrypt.

La tabella request_log contiene:

- request_id come chiave primaria, generata tramite hashing SHA-256 di email, username, operation e timestamp, così da garantirne l'unicità;
- operation, che distingue tra registrazione e cancellazione;
- timestamp della richiesta;
- message, ovvero la risposta associata alla richiesta, necessario per restituire sempre lo stesso esito in caso di duplicati;
- status_code, che identifica il risultato dell'operazione.

Il secondo database, Data DB, gestisce le informazioni sugli aeroporti di interesse e sui voli.
La tabella interests associa ogni utente agli aeroporti seguiti e contiene:

- email dell'utente;
- airport_code (codice ICAO).

  La chiave primaria è composta dai due campi precedenti.

La tabella flights raccoglie le informazioni provenienti da OpenSky e comprende:

- un id autoincrementale;
- icao24, identificativo esadecimale dell'aeromobile;
- callsign del volo;
- departure_airport e arrival_airport;
- departure_time e arrival_time;
- la data dell'ultimo aggiornamento.

Per strutturare i database abbiamo creato una cartella DB all'interno del progetto, nella quale sono presenti i due file .sql che definiscono le tabelle. Questi file non vengono eseguiti direttamente da quella cartella: durante la build del container MySQL vengono copiati in automatico nella directory docker-entrypoint-initdb.d del container.

È proprio questa directory interna a MySQL che consente l'inizializzazione automatica: al primo avvio del container, MySQL esegue tutti i file .sql presenti lì, creando così tabelle e strutture dati senza interventi manuali.

Pattern di comunicazione

L'architettura utilizza API REST e gRPC rispettivamente: per tutte le interazioni con il frontend e con i servizi esterni, e per la comunicazione interna tra microservizi.

All'esterno dei microservizi, la comunicazione tra Front-end, User Manager, Data Collector e OpenSky avviene tramite API REST, basate sul tradizionale pattern request/response su HTTP. Questo modello è semplice da implementare, indipendente dalla piattaforma e adatto a interazioni sincrone in cui il client richiede un'operazione e attende la risposta del server.
Il Front-end usa le API REST per accedere alle funzionalità offerte dai due servizi interni, mentre il Data Collector sfrutta lo stesso meccanismo per interrogare l'API pubblica di OpenSky e ottenere informazioni aggiornate su aeroporti e voli.
L'uso di REST garantisce un'interfaccia facilmente testabile e compatibile anche con strumenti esterni come Postman.

All'interno dell'ecosistema applicativo, invece, i microservizi comunicano tramite gRPC, un framework open-source per implementare Remote Procedure Calls in modo efficiente, multipiattaforma e scalabile.
Con gRPC è stato possibile definire User Manager e Data Collector, specificando: il formato dei messaggi di richiesta e risposta, e i metodi che possono essere invocati da remoto, insieme ai loro parametri e ai tipi di ritorno.
Per fare questo, gRPC utilizza i Protocol Buffers, che rappresentano il meccanismo utilizzato per la serializzazione di dati strutturati, a partire dai file .proto (che descriveremo fra breve), nei quali sono definiti i messaggi sotto forma di record di coppie nome-valore, e i metodi.
Grazie a gRPC le comunicazioni sono rapide e poco costose, il che è particolarmente utile per scambi frequenti e strutturati, come quelli tra User Manager e Data Collector.

File .proto e altri file di configurazione

Dopo aver predisposto i database, abbiamo definito i file .proto necessari alla comunicazione tra i microservizi tramite gRPC. Sono stati creati due file distinti: uno per lo User Manager e uno per il Data Collector, ciascuno progettato in base alle funzionalità del rispettivo servizio.

Il file dataCollector.proto, invece, contiene una gamma più ampia di messaggi e metodi, poiché il Data Collector gestisce operazioni eterogenee. Qui sono specificati servizi come AddAirport, RemoveAirport, ListAirports, RefreshFlights, ListFlights, AverageFlightsPerDay e LastFlights, ciascuno con il proprio formato di richiesta e risposta.

Tutti i servizi definiti nei due file .proto sono di tipo Unary RPC, cioè prevedono una singola richiesta e una singola risposta, analogamente a una normale funzione remota.

User Manager e Data Collector implementano le operazioni definite nei file .proto.
Inoltre, includono anche del codice Flask, per gestire le API REST esposte verso il browser, instradando le URL verso le funzioni appropriate.

La cartella del Data Collector contiene un file aggiuntivo, entrypoint.py, assente nello User Manager. Questo script ha un ruolo molto semplice: carica le credenziali OpenSky necessarie per accedere alle API e avvia l'esecuzione di dataCollector.py.
Questa soluzione è stata adottata per evitare di inserire nel repository GitHub credenziali sensibili come client ID e client secret.
Ogni sviluppatore può quindi collocare localmente il proprio file credentials.json, non tracciato nel repository grazie alla voce presente nel .gitignore.

Implementazione della Politica At-Most Once

La politica at-most-once garantisce che ogni messaggio venga elaborato non più di una volta.
Essa è stata implementata nella fase di registrazione e cancellazione di un utente.
Nel primo caso, ciò significa che l'invio di email, username e password allo User Manager viene processato zero o una volta, ma mai più.

Questa garanzia è assicurata dal campo request_id nella tabella request_log, generato in maniera univoca a partire da email, username, tipo di operazione e timestamp.
Prima di elaborare una nuova richiesta, lo User Manager verifica se l'id è già presente nel log: se sì, restituisce la stessa risposta memorizzata in precedenza; se no, processa la richiesta normalmente e registra l'esito insieme all'id nel log.

In questo modo, eventuali richieste duplicate — ad esempio dovute alla perdita della risposta originale — non provocano effetti collaterali come inserimenti o cancellazioni ripetute.
La memorizzazione dell'esito garantisce anche l'idempotenza dell'operazione: inviare più volte la stessa richiesta produce lo stesso risultato della prima esecuzione, senza errori.

Docker-Compose

Il progetto è strutturato con quattro container definiti nel file docker-compose.yml: userdb, datadb, user-manager e data-collector.

I due container dei database (userdb e datadb) sono configurati in modo da garantire isolamento e persistenza dei dati.
Inizialmente entrambi esponevano una porta verso l'esterno (3307 per userdb e 3308 per datadb), ma per motivi di sicurezza abbiamo rimosso la mappatura delle porte, così che i DB siano accessibili solo dai container autorizzati tramite reti interne dedicate. In particolare:

- userdb comunica esclusivamente tramite la rete user_db_net, cui è connesso solo il container user-manager.
- datadb comunica attraverso la rete data_db_net, cui è connesso solo il data-collector.

Entrambi i database sono associati a volumi persistenti, in modo da salvare i dati anche quando i container vengono ricreati.

Inoltre, all'interno dei container vengono montati file di inizializzazione .sql nella directory docker-entrypoint-initdb.d per creare automaticamente le tabelle al primo avvio.

Il container user-manager rappresenta il microservizio che gestisce le informazioni sugli utenti. Esso contiene le credenziali necessarie per connettersi al database userdb e comunica tramite gRPC e REST.
Il container espone due porte locali: 50051 per gRPC e 8081 per REST.
Dal punto di vista delle reti, user-manager è connesso sia ad app_net, la rete principale dell'applicazione per la comunicazione con il container data-collector, sia a user_db_net, necessaria per accedere al database in sicurezza.

Il container data-collector è il microservizio che gestisce la raccolta e l'elaborazione dei dati sui voli. Analogamente a user-manager, espone una porta REST (8082) per test e comunicazione con il front-end.
Per accedere al database datadb utilizza le credenziali specificate nelle variabili d'ambiente. Inoltre, il container monta in volume il file credentials.json contenente le credenziali per accedere alle API di OpenSky, garantendo così che i dati sensibili siano persistenti e accessibili in sola lettura (read-only).
Per quanto riguarda le reti, data-collector è connesso sia ad app_net sia a data_db_net, così da comunicare con il database e con lo user-manager.

Gestione delle Eccezioni

Abbiamo adottato una gestione delle eccezioni pragmatica e orientata alla continuità del servizio in entrambi i microservizi.

Nello User Manager, le operazioni di accesso al DB sono racchiuse in blocchi try/except, con rollback delle transazioni e ritorno di un codice 500 in caso di errori imprevisti.
Gestiamo, però, in modo specifico l'errore MySQL "duplicate key" (errno 1062) sull'inserimento in request_log per realizzare la semantica at-most-once e l'idempotenza: quando viene intercettato, recuperiamo e restituiamo messaggio e status originali.
La verifica delle password tramite bcrypt, intercetta eventuali eccezioni e restituisce False.
L'endpoint /exists – usato dal Data Collector per verificare l'esistenza di un utente che ha richiesto un servizio – cattura eccezioni DB e risponde con 500.
Alcuni aggiornamenti non critici alla tabella request_log sono gestiti in modalità best effort: un errore non interrompe il flusso e viene semplicemente registrato nei log.

Nel Data Collector, gli errori di rete verso lo User Manager (ad es. nella chiamata a /exists) e verso OpenSky sono gestiti con try/except, log e fallback non bloccanti: vengono restituiti messaggi di errore ma senza interrompere il servizio.
Infatti, durante l'ingest dei voli, ogni INSERT è protetto tramite try/except per "skippare" record problematici senza interrompere il batch.
Le operazioni CRUD gRPC critiche (Add/Rem. airport) catturano eccezioni DB e ritornano 500.
Gli endpoint REST, invece, applicano controlli preventivi sui parametri, e restituiscono codici 4xx per segnalare errori dell'utente, mentre lasciano propagare gli errori inattesi come 500.

I principali codici di stato usati nel progetto sono:

- 200: Operazione riuscita (es. login ok, delete ok, rimozione aeroporto riuscita…);
- 201: Risorsa creata (es. utente creato, aeroporto aggiunto…);
- 400: Richiesta non valida (es. campi mancanti in add/delete/login, /exists senza email/username);
- 401: Non autorizzato / credenziali invalide (es. login con password errata);
- 404: Non trovato (es. utente inesistente in delete);
- 409: Conflitto con risorse esistenti (es. email/username già esistenti in add, interesse già presente in add_airport);
- HTTP 500: Errore interno (es. errori DB generici, eccezioni durante inserimenti/refresh OpenSky).

REST API

Lo UserManager espone tre REST API principali, attraverso cui è possibile gestire gli utenti del sistema:

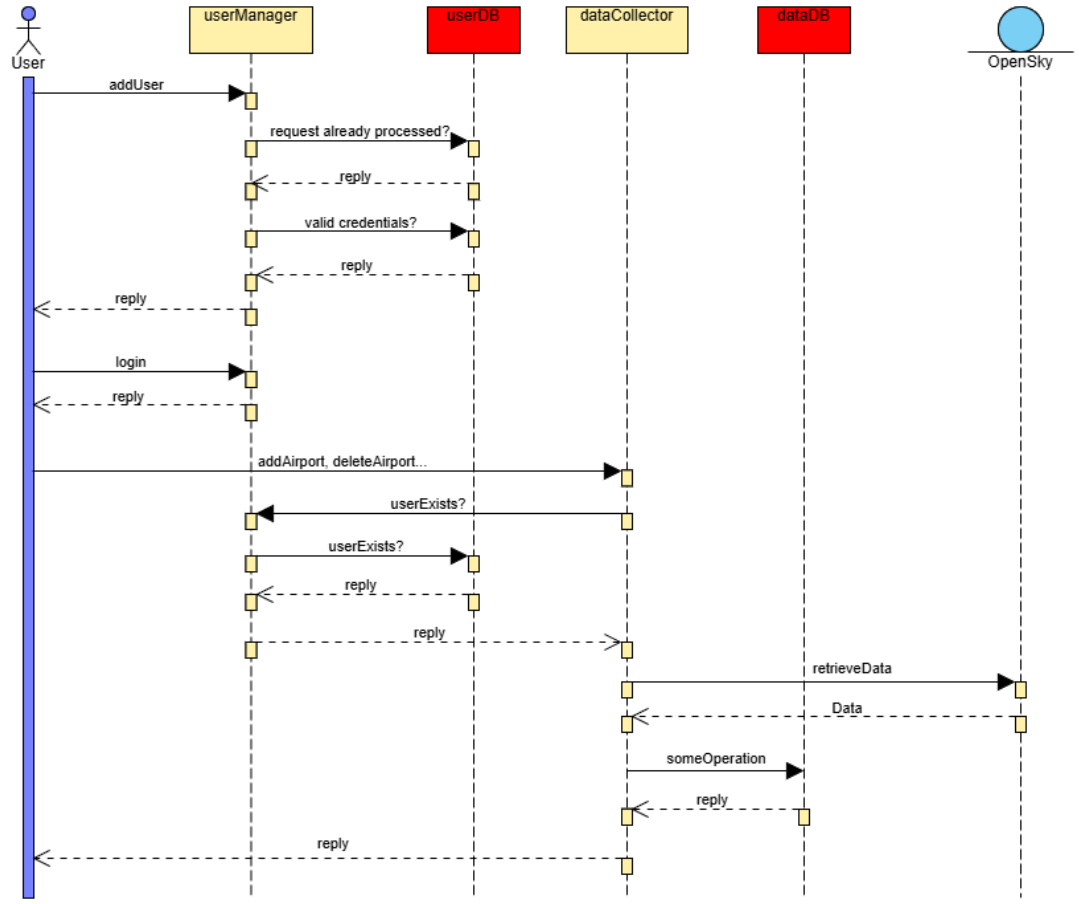
- POST /addUser: registra un nuovo utente nel sistema.
- POST /deleteUser: rimuove un utente già esistente.
- POST /loginUser: permette a un utente di autenticarsi e ottenere accesso ai servizi offerti dal DataCollector.
- GET /exists: verifica che un utente sia registrato.

Il DataCollector mette invece a disposizione una serie più ampia di endpoint, dedicati alla gestione degli aeroporti di interesse e all'analisi dei voli::

- GET /airport_suggest: fornisce suggerimenti durante la ricerca degli aeroporti da aggiungere agli interessi;
- POST /add_airport: aggiunge un aeroporto alla lista degli aeroporti seguiti dall'utente;
- POST /remove_airport: rimuove un aeroporto dagli interessi dell'utente;
- POST /list_airports: restituisce l'elenco completo degli aeroporti di interesse;
- POST /refresh: interroga le API OpenSky e aggiorna il database con i nuovi voli relativi agli aeroporti monitorati;
- POST /list_flights: restituisce tutti i voli associati a un determinato aeroporto;
- POST /debug_data_range: mostra l'intervallo temporale coperto dai voli attualmente presenti nel database.
- POST /average_flights_per_day: calcola il numero medio di voli in partenza e in arrivo da un dato aeroporto registrati negli ultimi X giorni;
- POST /last_flights: restituisce gli ultimi voli in partenza e in arrivo da un aeroporto specificato;

Schema di Comunicazione Dettagliato

Si mostra uno schema di comunicazione completo, in cui un utente si registra (con successo) all'applicazione, effettua il login, e interagisce con il data collector richiamando alcune delle funzioni offerte:



Iterazione 2

Nuove funzionalità

Il sistema sviluppato è stato esteso introducendo nuove funzionalità che ne ampliano le capacità di monitoraggio, notifica e robustezza architetturale.

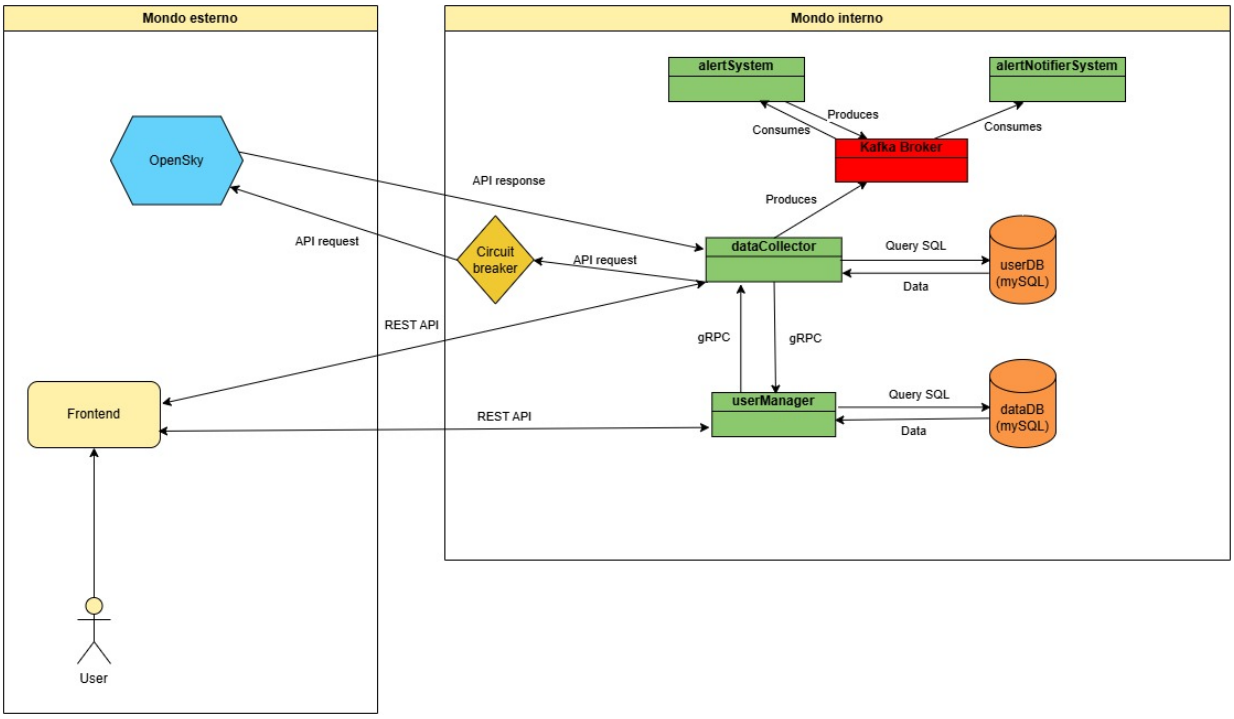
La principale estensione riguarda la possibilità per l'utente di configurare, per ciascun aeroporto di interesse, due parametri di soglia opzionali: high-value e low-value.
A seguito di ogni aggiornamento dei dati, il sistema verifica per ciascun utente e per ciascun aeroporto monitorato se la somma dei voli in arrivo e in partenza supera la soglia superiore (condizione Above-high) oppure scende al di sotto di quella inferiore (condizione Below-low).
Nel caso in cui una delle due condizioni si verifichi, l'utente viene notificato tramite email.

Per supportare questo meccanismo in modo asincrono e scalabile, è stato integrato un message broker basato su Kafka, utilizzato per la comunicazione tra il Data Collector e due nuovi componenti introdotti nel sistema: AlertSystem e AlertNotifierSystem.
In particolare, il Data Collector pubblica un messaggio sul broker al termine della fase di aggiornamento dei voli, includendo le informazioni relative al numero di voli registrati per ciascun aeroporto di interesse.
L'AlertSystem, in qualità di consumer, elabora tali messaggi verificando per ogni profilo utente il rispetto delle soglie configurate e, se necessario, pubblica un nuovo messaggio contenente il dettaglio della condizione rilevata.
L'AlertNotifierSystem, infine, consuma questi messaggi e si occupa dell'invio delle notifiche email agli utenti interessati.

Un'ulteriore estensione riguarda l'introduzione di un API Gateway, realizzato tramite NGINX, che funge da punto di ingresso unico per il sistema.
Questa soluzione consente di centralizzare l'accesso ai servizi, migliorando la gestione delle richieste e facilitando eventuali evoluzioni future dell'architettura.

Infine, è stato integrato un Circuit Breaker a protezione di tutte le operazioni verso il servizio esterno OpenSky Network.
Questo meccanismo aumenta la resilienza del sistema, evitando interrogazioni ripetute verso un servizio non disponibile e riducendo l'impatto di fault esterni sulle componenti interne.

Schema Architetturale Aggiornato



Database Aggiornato

L'unica modifica apportata ai database riguarda il Data DB.
In particolare, la tabella interests è stata estesa con i campi high_value e low_value per supportare i nuovi parametri di soglia introdotti dal sistema.
Essi rappresentano rispettivamente la soglia superiore e inferiore sul numero totale di voli associati a un aeroporto di interesse di un utente.
È stato inoltre introdotto un vincolo di consistenza che impone, nel caso in cui entrambi i valori siano presenti, che high_value sia maggiore di low_value.

La tabella aggiornata risulta quindi composta dai seguenti campi:

- email;
- airport_code;
- high_value e low_value.

Circuit Breaker

Il Circuit Breaker è un componente utilizzato per controllare e proteggere le chiamate verso servizi remoti, interrompendo automaticamente le richieste quando viene rilevato un numero eccessivo di fallimenti consecutivi.
L'adozione di questo meccanismo offre diversi vantaggi all'interno del sistema, tra cui:

- si evitano interrogazioni ripetute verso un servizio non disponibile,
- si impedisce che il failure di un servizio ne comprometta altri (guasti in cascata),
- si riduce lo spreco di risorse computazionali su operazioni destinate a fallire,
- si riducono i tempi d'attesa restituendo rapidamente un errore controllato.

Nel sistema sviluppato, il Circuit Breaker è impiegato per proteggere tutte le chiamate verso il servizio esterno OpenSky Network, riducendone l'impatto complessivo in caso di indisponibilità prolungata.

L'implementazione è stata realizzata tramite un modulo Python dedicato, non containerizzato, collocato all'interno della directory del Data Collector.
Tale modulo definisce una classe che mantiene uno stato interno e gestisce il flusso delle richieste sulla base di alcuni parametri fondamentali: un contatore dei fallimenti, una soglia di errore (threshold), e un timer di recupero (recovery timeout).

Lo stato può assumere, in base alla disponibilità del servizio remoto, tre diversi valori:

- Closed (Chiuso): OpenSky è disponibile, e tutte le richieste gli vengono inoltrate normalmente. In questo stato viene monitorato il numero di fallimenti consecutivi incrementando il contatore: al superamento della soglia, il Circuit Breaker transita allo stato Open.
- Open (Aperto): OpenSky è indisponibile, e tutte le richieste vengono immediatamente bloccate restituendo un errore. Quando il sistema entra in questo stato, viene avviato il timer di recupero, al termine del quale lo stato passa a Half-Open.
- Half-Open (Semichiuso): viene consentita una singola richiesta di test per verificare se il servizio sia tornato operativo. In caso di successo il Circuit Breaker ritorna nello stato Closed, mentre in caso di fallimento viene nuovamente impostato su Open.

I valori dei parametri della classe sono stati scelti in modo coerente con le caratteristiche dell'applicazione e del servizio OpenSky:

- failure_threshold: numero massimo di fallimenti consecutivi prima di passare allo stato Open.
  È stato impostato a 5, un valore pragmatico per API pubbliche come OpenSky, dove sono frequenti errori transitori. In questo modo distinguiamo meglio un guasto persistente dal "rumore" di rete, evitando aperture troppo aggressive ma senza ritardare eccessivamente la protezione;
- recovery_timeout: tempo di attesa, espresso in secondi, prima di passare dallo stato Open allo stato Half-Open.
  Il valore scelto è 60 secondi, bilanciando reattività e prudenza nel tentativo di ripristino del servizio. Un minuto è, infatti, abbastanza lungo da lasciare tempo al servizio di riprendersi da malfunzionamenti temporanei ed evitare retry troppo frequenti, ma abbastanza corto da non penalizzare troppo il flusso dati;
- expected_exception: tipologia di eccezioni monitorate.
  È stato utilizzato il tipo generico Exception per catturare in modo uniforme tutte le anomalie operative delle chiamate HTTP, mantenendo il breaker semplice e robusto.

Il DataCollector effettua il wrapping delle chiamate alle API di OpenSky tramite un'istanza del Circuit Breaker. In questo modo, ogni fallimento o successo aggiornano lo stato locale del breaker secondo le logiche descritte.

È anche prevista una modalità di test, impostando FORCE_OPENSKY_ERRORS=true per il container data-collector nel compose, che forza errori per verificare il comportamento.

Infine, le già discusse credenziali di OpenSky sono state spostate dal file credentials.json (rimosso) a un file .env, anch'esso non tracciato nel repository grazie alla voce presente nel .gitignore per permettere una configurazione sicura dei dati privati dell'utente.

Broker Kafka

Apache Kafka è un sistema di messaggistica distribuito che consente di pubblicare e sottoscriversi a flussi di messaggi organizzati in topic. È progettato per funzionare come un cluster scalabile, una piattaforma centrale in grado di scalare elasticamente per gestire più flussi di dati in modo efficiente.
Kafka non è soltanto un sistema di messaging, ma anche un sistema di archiviazione persistente: i messaggi vengono salvati su disco, replicati tra più broker e mantenuti per il tempo necessario. Questo garantisce durabilità dei dati e affidabilità nella consegna, anche in presenza di fault temporanei.
Un broker Kafka è un singolo server che riceve i messaggi dai producer, assegna loro un offset progressivo e li memorizza su disco. Allo stesso tempo, serve i consumer, rispondendo alle richieste di lettura e inviando i messaggi salvati.

Nel sistema sviluppato, Kafka è stato introdotto per implementare un meccanismo asincrono di notifica, che consente agli utenti di essere informati quando un aeroporto di loro interesse registra un numero di voli superiore o inferiore alle soglie configurate.
Il meccanismo di notifica è basato su due topic Kafka distinti:

- to-alert-system
- to-notifier

Il DataCollector agisce come producer del topic to-alert-system. Al termine della fase di aggiornamento dei dati provenienti da OpenSky, pubblica un messaggio che segnala il completamento dell'aggiornamento e contiene le informazioni raccolte per ciascun aeroporto di interesse. Il messaggio pubblicato include:

- codice dell'aeroporto;
- numero di voli in arrivo;
- numero di voli in partenza;
- timestamp.

Il consumer del topic to-alert-system è il nuovo componente AlertSystem che, per ogni messaggio ricevuto:

1. calcola la somma dei voli in arrivo e in partenza per l'aeroporto indicato;
2. verifica, per tutti gli utenti che hanno quell'aeroporto tra i propri interessi, se il valore supera la soglia high_value o scende sotto la soglia low_value (se presenti nel DB);
3. in caso di condizione verificata, pubblica un messaggio nel topic to-notifier.

Il messaggio prodotto da AlertSystem contiene:

- email dell'utente;
- codice dell'aeroporto;
- condizione rilevata (above_high oppure below_low);
- timestamp.

I messaggi pubblicati nel topic to-notifier vengono consumati da un altro nuovo componente: l'AlertNotifierSystem. Alla ricezione di ciascun messaggio, il servizio invia una notifica all'utente tramite email.
Per ogni condizione verificata viene inviata una singola email all'utente, contenente le informazioni relative all'aeroporto e al tipo di superamento della soglia.

Le email vengono inviate via SMTP con STARTTLS: la connessione è cifrata con TLS sulla porta 587 e utilizza credenziali e mittente letti dalle variabili d'ambiente (.env), configurabili seguendo le indicazioni in .env.example. Se l'SMTP non è impostato oppure DISABLE_EMAIL=true, il servizio effettua un "mock send": registra l'invio nei log senza spedire realmente, così l'intero flusso resta testabile in sicurezza.

Un aspetto rilevante riguarda i parametri di configurazione utilizzati per l'inizializzazione dei producer Kafka, sia nel DataCollector sia in AlertSystem (lato producer).
I parametri principali sono:

- acks=all: il broker risponde positivamente solo quando tutte le repliche hanno scritto il messaggio, garantendo la massima affidabilità;
- max.in.flight.requests.per.connection=5: consente fino a 5 richieste non ancora confermate sulla stessa connessione;
- retries=5: numero massimo di tentativi di ritrasmissione in caso di errore;
- linger.ms=10: tempo di attesa (in ms) prima dell'invio di un batch di messaggi.

La possibilità di mantenere più richieste in-flight è coerente con la natura dell'applicazione, in cui l'ordinamento globale dei messaggi non è critico. Poiché sono consentite fino a 5 richieste parallele, anche il numero di retry è stato impostato allo stesso valore, in modo da aumentare la probabilità di consegna in presenza di fault temporanei.

Per quanto riguarda i consumer, invece, i parametri impostati per AlertSystem e AlertNotifierSystem sono i seguenti:

- auto.offset.reset=latest: se il consumer non dispone di un offset salvato, inizierà a consumare i messaggi dalla fine del topic. Questa scelta evita il consumo di messaggi storici (potenzialmente vecchi di molte ore), che potrebbe generare un numero elevato di notifiche indesiderate e causare un sovraccarico del sistema di alert;
- enable.auto.commit=true: abilita il commit automatico periodico degli offset, semplificando la gestione e risultando adeguato in uno scenario in cui una duplicazione occasionale delle notifiche è tollerabile.

I topic to-alert-system e to-notifier vengono creati implicitamente dal broker Kafka, senza una configurazione esplicita del numero di partizioni nel file di compose. Di conseguenza, viene utilizzato il valore di default del broker, tipicamente una sola partizione.
Questa scelta comporta le seguenti implicazioni:

- per ogni topic, un solo consumer alla volta può leggere i messaggi all'interno dello stesso consumer group;
- l'ordinamento dei messaggi è totale;
- non è presente parallelismo intra-topic e la scalabilità è limitata;
- il modello risultante è assimilabile a una comunicazione point-to-point (un producer – un consumer).

L'invio dei messaggi Kafka avviene in modo asincrono, utilizzando una callback di conferma. In particolare, il DataCollector e l'AlertSystem utilizzano la callback _delivery_report viene invocata quando il broker risponde, consentendo di registrare il successo o il fallimento dell'invio senza bloccare l'applicazione sul singolo messaggio.

L'integrazione di Kafka introduce diversi benefici architetturali nel sistema realizzato:

- forte disaccoppiamento: il DataCollector pubblica eventi senza conoscere i consumer ➔ AlertSystem e AlertNotifierSystem possono evolvere in modo indipendente;
- affidabilità e recupero: grazie alla persistenza dei topic e ad acks=all, i messaggi non vengono persi durante picchi di carico o fault temporanei;
- Buffering e backpressure: Kafka assorbe i burst di pubblicazioni (per aeroporto) e consente ai consumer di processare al ritmo disponibile, evitando blocchi tra servizi.
- Scalabilità futura: è possibile aumentare le partizioni e aggiungere istanze dei consumer per processare in parallelo.

API Gateway

In un'architettura a microservizi, i client non dovrebbero interagire direttamente con i singoli servizi. Farlo causa problemi critici:

- Ogni servizio deve essere chiamato direttamente, aumentano la latenza;
- I client devono conoscere indirizzi IP e porte dei servizi, che sono dinamici per natura (mancanza di Location Transparency).
- I client sono costretti a implementare protocolli di backend specifici;
- Modifiche architetturali richiedono aggiornamenti alle implementazioni lato client (mancanza di Distribution transparency).

Per risolvere questi problemi, si è deciso di implementare nel sistema un API Gateway, che agisce come unico punto di ingresso per tutte le richieste dai client.
Questa soluzione consente di nascondere la complessità interna e disaccoppiare il client dall'implementazione backend, offrendo Distribution Transparency, Location Transparency e Replication Transparency.

L'API Gateway è stato realizzato integrando nel sistema un container NGINX.
NGINX è ottimale in quanto è un web server open-source ad alte prestazioni, in grado di gestire migliaia di connessioni concorrenti grazie a un'architettura asincrona e non bloccante.
Questo componente opera come reverse proxy e web server, con le seguenti responsabilità:

- ascoltare richieste HTTP sulla porta 80;
- porsi frontalmente rispetto a tutti i microservizi;
- instradare le richieste verso il microservizio corretto in base al path richiesto;
- servire i contenuti statici dell'interfaccia web.

L'API Gateway è collegato alla rete interna app_net, all'interno della quale sono presenti anche i microservizi applicativi.

La logica di instradamento è definita nel file routing.conf, che separa chiaramente le rotte statiche dell'interfaccia web dalle rotte API dei microservizi.
I contenuti statici serviti direttamente da NGINX includono:

- / – la homepage dell'applicazione;
- /registration – la pagina di registrazione dell'utente;
- /login – la pagina di login;
- /dashboard – il "cuore" dell'applicazione, da dove possono venire usate tutte le funzionalità previste.

Per quanto riguarda le API:

- le richieste con path /api/users/ vengono inoltrate al microservizio UserManager sulla porta 8081;
- le richieste con path /api/ e /flights/ vengono inoltrate al microservizio DataCollector sulla porta 8082.

I nomi dei servizi sono risolti tramite il DNS interno di Docker, sfruttando la rete app_net, così il client ha un unico endpoint pubblico e non accede direttamente alle porte interne.

Per illustrare il funzionamento dell'API Gateway, si supponga di ricevere una richiesta http://localhost/api/users/login, il flusso è il seguente:

- NGINX riceve la richiesta sulla porta 80;
- il path /api/users viene riconosciuto e associato al microservizio UserManager;
- la richiesta viene inoltrata a user-manager:8081;
- lo UserManager elabora la richiesta e produce la risposta;
- NGINX restituisce la risposta al client.

In questo modo, si ottiene un gateway semplice, che centralizza il routing, proteggendo la topologia interna, e servendo l'interfaccia web dallo stesso punto di ingresso.

Docker Compose Aggiornato

A seguito dell'introduzione dei nuovi requisiti, il file docker-compose.yml è stato esteso includendo ulteriori container che implementano i nuovi meccanismi.

È stato innanzitutto aggiunto il container kafka, configurato in modalità KRaft single-node (quindi senza l'uso di ZooKeeper), ed è collegato alla rete app_net per consentire la comunicazione con i microservizi applicativi. Il broker espone la porta 9092 verso l'host per debugging, mentre i container interni comunicano tramite il listener interno sulla porta 29092. Anche Kafka è associato a un volume persistente (kafka_data) per garantire la durabilità dei messaggi e dei log.

Il container data-collector è stato aggiornato per integrare Kafka come producer. Oltre alle variabili d'ambiente già presenti per la connessione al DB e allo User Manager, sono stati aggiunti i parametri relativi al broker Kafka e ai topic utilizzati (to-alert-system e to-notifier). Il servizio resta connesso sia alla rete app_net sia alla rete data_db_net, mantenendo l'isolamento del database.

È stato introdotto il container alert-system come consumer del topic to-alert-system e come producer del topic to-notifier. Questo servizio è responsabile della logica di verifica delle soglie configurate dagli utenti (high-value e low-value). Per svolgere tale funzione, è connesso sia alla rete app_net, per comunicare con Kafka, sia alla rete data_db_net, per accedere in modo sicuro al Data DB e recuperare le informazioni sugli interessi degli utenti. L'uso di un consumer group dedicato consente future estensioni in termini di scalabilità.

Un ulteriore container aggiunto è alert-notifier, che consuma i messaggi pubblicati sul topic to-notifier e, per ogni condizione rilevata, invia una email all'utente interessato. Le credenziali SMTP e i parametri sensibili non sono hardcoded, ma caricati tramite un file .env, migliorando la sicurezza e la portabilità del sistema. Anche questo container è collegato esclusivamente alla rete app_net, poiché non necessita di accesso diretto ai database.

Infine, è stato introdotto il container api-gateway, basato su NGINX. Il gateway espone la porta 80 verso l'esterno e instrada le richieste HTTP verso i microservizi appropriati (User Manager, Data Collector e componenti di supporto), sfruttando il DNS interno di Docker sulla rete app_net.

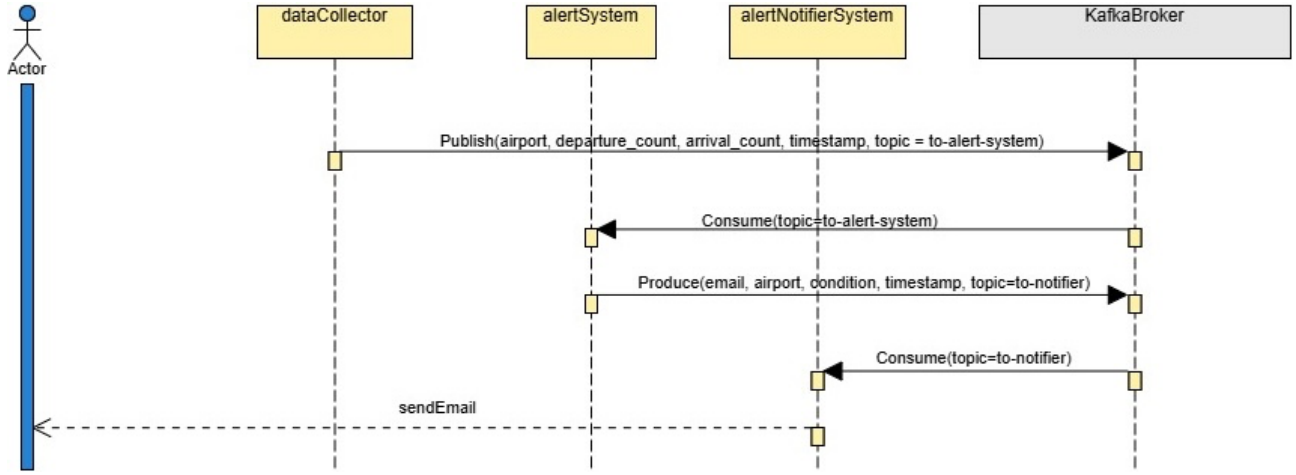
REST API Aggiornate

Il Data Collector espone le seguenti nuove API:

- POST /list_airports_with_thresholds: restituisce la lista degli aeroporti di interesse dell'utente con le soglie configurate (campi high_value e low_value).
- POST /update_thresholds: imposta o azzera le soglie per un aeroporto seguito dall'utente; i campi vuoti vengono interpretati come null per rimuovere la soglia.

Schema di Comunicazione Dettagliato

Viene presentato uno schema di comunicazione completo che illustra l'intero flusso del sistema: dall'aggiornamento dei dati sui voli, alla pubblicazione dei messaggi sui topic Kafka, fino alla trasmissione della notifica email all'utente finale.



Iterazione 3

Nella terza parte dell'homework il sistema è stato ulteriormente esteso introducendo un meccanismo di white-box monitoring, finalizzato alla raccolta di metriche sulle prestazioni interne di alcuni microservizi dell'applicazione.
Parallelamente, l'intera architettura è stata adattata per il deployment ed esecuzione su piattaforma Kubernetes, abbandonando l'esecuzione esclusiva tramite Docker Compose.

Il sistema di monitoraggio white-box, prevede che i microservizi espongano esplicitamente informazioni sul proprio stato interno.
A tal fine, è stato integrato Prometheus come componente centrale di raccolta delle metriche, eseguito anch'esso come servizio all'interno del cluster Kubernetes.
I microservizi selezionati per il monitoraggio sono: lo User Manager, il Data Collector, l'AlertSystem e l'AlertNotifierSystem, che sono stati modificati per esporre un endpoint dedicato alle metriche (/metrics), nel formato testuale richiesto da Prometheus.
Ciascun servizio monitorato fornisce, come richiesto:

- metriche di tipo GAUGE, per rappresentare valori istantanei legati alle prestazioni;
- metriche di tipo COUNTER, per tracciare valori cumulativi;
- una label identificativa del servizio, per distinguere l'origine delle metriche;
- una label che identifica il nodo Kubernetes su cui il servizio è in esecuzione, consentendo analisi legate alla distribuzione del carico e all'infrastruttura.

Per quanto riguarda il deployment, l'intero sistema è stato distribuito su Kubernetes, utilizzando un cluster locale creato tramite kind.
Sono stati definiti e utilizzati opportuni oggetti Kubernetes, tra cui Deployment, Service, ConfigMap, per gestire il ciclo di vita dei microservizi, l'esposizione delle porte e la comunicazione interna tra i componenti.

Prometheus

Per ciascun microservizio monitorato sono state implementate metriche specifiche che riflettono le caratteristiche funzionali del componente.

UserManager espone metriche relative alle operazioni di autenticazione e gestione utenti:

- COUNTER: numero totale di richieste ricevute sull'endpoint /exists, tentativi di login (suddivisi per esito successo/fallimento), tentativi di registrazione (suddivisi per esito successo/fallimento);
- GAUGE: tempo di risposta delle invocazioni REST all'endpoint /exists, numero totale di utenti registrati nel sistema.

DataCollector fornisce metriche relative all'acquisizione dati da OpenSky Network e alla pubblicazione su Kafka:

- COUNTER: numero totale di richieste di refresh manuale, eventi di apertura e fallimento del Circuit Breaker, fallimenti delle chiamate verso OpenSky API (suddivisi per motivo: circuit_open, other), messaggi Kafka pubblicati (suddivisi per esito successo/fallimento)
- GAUGE: latenza delle chiamate verso l'API OpenSky (misurata per ciascun aeroporto), numero di aeroporti attualmente tracciati, numero totale di voli memorizzati nel database

AlertSystem traccia l'elaborazione degli eventi di alert:

- COUNTER: numero di alert processati e inoltrati al sistema di notifica (suddivisi per tipo di condizione: ABOVE_HIGH, BELOW_LOW)
- GAUGE: tempo di elaborazione dei messaggi Kafka ricevuti dal topic to-alert-system

AlertNotifier monitora l'invio delle notifiche email:

- COUNTER: numero di email inviate (suddivise per esito: success, failed, mocked), errori SMTP riscontrati durante l'invio (suddivisi per tipologia: authentication, connection, other)

Ogni metrica è arricchita da due label obbligatorie: service, che identifica il nome del microservizio (es. user-manager, data-collector, alert-system, alert-notifier), e node, che identifica l'hostname del pod in Kubernetes o del container in Docker Compose.

Prometheus è stato deployato come microservizio aggiuntivo, configurato (nel file yaml) per effettuare scraping automatico ogni 15 secondi dagli endpoint /metrics esposti da ciascun componente. In ambiente K8s, è stata abilitata la service discovery: Prometheus interroga dinamicamente l'API di K8s per individuare i pod con le label applicative corrispondenti (app=user-manager, app=data-collector, ...) e ne costruisce in automatico l'indirizzo di scraping combinando l'IP del pod con la porta del servizio. Così la necessità di configurazioni statiche viene meno e il sistema risulta resiliente alla creazione/distruzione dinamica dei pod.

È stato inoltre sviluppato un metrics reader in Python, in grado di interrogare l'API HTTP di Prometheus, eseguire query PromQL per estrarre le metriche raccolte, calcolare statistiche aggregate (media, minimo, massimo) su finestre temporali configurabili, e generare grafici temporali salvati come immagini PNG tramite matplotlib.
Il tool consente di visualizzare l'andamento dei tempi di risposta, il tasso di richieste al secondo, lo stato del Circuit Breaker, e l'andamento delle notifiche inviate.

Kubernetes

L'intero sistema è stato deployato su un cluster Kubernetes locale creato con Kind, configurato con 1 nodo control-plane e 2 nodi worker per simulare un ambiente distribuito. Tutti i microservizi sono stati containerizzati con Docker e caricati nel cluster Kind tramite 'kind load docker-image', utilizzando imagePullPolicy: Never' per garantire l'uso delle immagini locali invece di cercarle su registry remoti.

kind-config
Il file kind-config.yaml configura la topologia del cluster specificando un nodo control-plane con label 'ingress-ready=true' per l'Ingress Controller e due nodi worker.
La configurazione include extraPortMappings che mappano le porte 80 (HTTP) e 443 (HTTPS) dal container Kind all'host, consentendo l'accesso esterno ai servizi tramite Ingress e rendendo l'applicazione accessibile da 'localhost'.

Kustomize
Il deployment utilizza Kustomize per orchestrare le risorse in modo semplificato.
Il file kustomization.yaml definisce l'ordine di applicazione delle risorse (namespace → configmaps → database → servizi → ingress → prometheus) e applica label comuni a tutte le risorse ('project: dsbd-flight-tracker', 'environment: development').
Il secretGenerator crea automaticamente i Secret ('db-secrets', 'smtp-secrets', 'opensky-secrets') leggendo il file '.secrets.env' copiato dagli script di deploy, evitando l'esposizione di credenziali sensibili nei file YAML versionati.
Questo approccio permette il deployment dell'intero sistema con un singolo comando: 'kubectl apply -k k8s/'.

namespace
Il file namespace.yaml crea un namespace isolato denominato 'dsbd', all'interno del quale risiedono tutte le risorse del progetto, evitando conflitti con altre applicazioni presenti nel cluster e fornendo un boundary logico per la gestione delle policy di sicurezza e delle risorse.

ConfigMap
Il ConfigMap app-config centralizza i parametri di configurazione non sensibili condivisi da tutti i microservizi, includendo gli hostname e le porte dei servizi ('kafka-broker: kafka.dsbd.svc.cluster.local:29092', 'userdb-host: userdb', 'datadb-host: datadb'), i topic Kafka ('to-alert-system', 'to-notifier') e l'intervallo di refresh (12 ore = 43200 secondi).
Altri due ConfigMap ('userdb-init' e 'datadb-init') contengono gli script SQL per inizializzare le tabelle dei database.

Secret
I Secret memorizzano dati sensibili come credenziali database, SMTP e OpenSky API, iniettandoli nei pod come variabili d'ambiente tramite 'valueFrom.secretKeyRef', garantendo che le informazioni sensibili non siano esposte nella configurazione YAML.

userdb e datadb

I file userdb.yaml e datadb.yaml definiscono due StatefulSet invece di Deployment.
A differenza dei pod gestiti tramite Deployment (intercambiabili, senza persistenza dello storage, adatti a servizi stateless), l'uso di StatefulSet consente di avere pod con identità stabile, volume persistente dedicato e nome deterministico (‘userdb-0’, ‘datadb-0’).
In questo modo i database mantengono il proprio stato anche in caso di riavvio del pod.

Kafka

Anche Kafka (kafka.yaml) è gestito come StatefulSet poiché deve memorizzare in modo persistente i log dei messaggi.
Il deployment utilizza modalità KRaft* (senza ZooKeeper), riducendo complessità e latenza tramite il protocollo Raft per la gestione del consenso distribuito.
Viene creato un singolo pod ‘kafka-0’.

UserManager e DataCollector

I Deployment user-manager.yaml e data-collector.yaml sono configurati rispettivamente con 2 e 3 repliche per garantire alta disponibilità e load balancing.
I pod espongono le porte: 8081 e 8082 per le metriche Prometheus ed endpoint HTTP, e 50051 e 50052 per le comunicazioni gRPC.
Le variabili d'ambiente vengono iniettate da ConfigMap (DB_HOST, DB_PORT) e Secret (DB_USER, DB_PASSWORD).
Oltre alle credenziali del database, il DataCollector riceve le credenziali OpenSky (‘CLIENT_ID’, ‘CLIENT_SECRET’) dal Secret ‘opensky-secrets’ e l'indirizzo del UserManager (‘USER_MANAGER_HOST: user-manager’, ‘USER_MANAGER_PORT: 50051’) per la validazione degli utenti tramite gRPC.
La configurazione Kafka nel DataCollector include il broker address e i topic per la pubblicazione degli eventi (‘KAFKA_TOPIC_TO_ALERT’, ‘KAFKA_TOPIC_TO_NOTIFIER’).
I Service associati di tipo ClusterIP espongono le porte (HTTP e gRPC) e bilancia il traffico tra le 3 repliche.

AlertSystem

Il Deployment alert-system.yaml ha 1 singola replica per garantire l'elaborazione ordinata dei messaggi Kafka ed evitare la duplicazione del processamento.
Il pod espone la porta 8083 per le metriche Prometheus.
Essendo un consumer Kafka, non necessita di un Service per l'accesso esterno, operando esclusivamente come componente interno.
Le variabili d'ambiente configurano i topic Kafka di input (‘KAFKA_TOPIC_IN: to-alert-system’) e output (‘KAFKA_TOPIC_OUT: to-notifier’), il consumer group (‘KAFKA_GROUP_ID: alert-system-group’) e le credenziali del database per verificare le soglie configurate dagli utenti.

AlertNotifier

Il Deployment alert-notifier.yaml ha anch'esso 1 replica per evitare l'invio duplicato di email.
Il pod espone la porta 8000 per FastAPI e le metriche Prometheus.
Le credenziali SMTP vengono iniettate dal Secret ‘smtp-secrets’ per l'invio delle email.

È presente anche la variabile ‘DISABLE_EMAIL’ (opzionale) per abilitare la modalità mock durante il testing. Il Service associato espone la porta 8000 per consentire health check e scraping delle metriche da parte di Prometheus.

API Gateway
Il file api-gateway.yaml descrive il Deployment dell'API Gateway containerizzato (NGINX) con 2 repliche. L'API Gateway espone file statici HTML (dashboard) e funge da reverse proxy verso i microservizi utilizzando i nomi DNS dei Service Kubernetes.
Il file di configurazione NGINX (‘routing.conf’) definisce blocchi upstream con strategia di bilanciamento ‘least_conn’ per distribuire il carico.

Ingress
Il file ingress.yaml definisce le regole di routing HTTP che l'Ingress Controller legge per configurare il proprio proxy. Le richieste con path ‘/’ (Prefix) vengono instradate verso ‘api-gateway:80’, fornendo un unico punto di ingresso per tutte le richieste HTTP esterne.

Il flusso completo delle richieste HTTP è il seguente:

1. Il browser richiede ‘http://localhost/dashboard’;
2. Docker (Kind) riceve la richiesta sulla porta 80, mappata dal nodo control-plane tramite ‘extraPortMappings’;
3. L' Ingress Controller legge le regole definite in ‘dsbd-ingress’ e instrada le richieste con path ‘/’ verso ‘api-gateway:80’;
4. Il Service api-gateway bilancia il traffico tra i 2 pod dell'API Gateway;
5. Il pod api-gateway (NGINX) gestisce il routing interno: ‘/dashboard’ serve i file statici HTML, ‘/api/users’ fa proxy verso ‘user-manager:8081’, ‘/flights’ e ‘/api’ fanno proxy verso ‘data-collector:8082’;
6. I Service ‘user-manager’ (porta 8081) e ‘data-collector’ (porta 8082), entrambi di tipo ClusterIP, bilanciano le richieste tra le rispettive repliche);
7. Il pod del microservizio processa la richiesta leggendo la configurazione dalle ConfigMap e le credenziali dai Secret, si connette al database tramite Service headless (‘user-manager’ → ‘userdb:3306’ → ‘userdb-0’, ‘data-collector’ → ‘datadb:3306’ → ‘datadb-0’);
8. Il data-collector pubblica eventi su Kafka (‘kafka.dsbd.svc.cluster.local:29092’) sui topic ‘to-alert-system’ e ‘to-notifier’.

In parallelo, in modo asincrono:

- L' alert-system consuma dal topic ‘to-alert-system’, verifica le soglie configurate nel database, elabora i messaggi e pubblica gli alert sul topic ‘to-notifier’
- L' alert-notifier consuma dal topic ‘to-notifier’ e invia le email di notifica tramite SMTP utilizzando le credenziali configurate nei Secret

Il deployment completo avviene tramite gli script deploy.sh (Linux/macOS) o deploy.ps1 (Windows) che eseguono automaticamente:

1. Creazione del cluster Kind con la configurazione specificata in kind-config.yaml
2. Build delle immagini Docker per tutti i microservizi (UserManager, DataCollector, AlertSystem, AlertNotifier, API Gateway)
3. Caricamento delle immagini nel cluster con 'kind load docker-image'
4. Copia del file '.secrets.env' nella directory k8s per consentire a Kustomize di generare i Secret
5. Applicazione di tutte le risorse Kubernetes con 'kubectl apply -k k8s/'
6. Attesa della disponibilità dei pod con 'kubectl wait --for=condition=ready'
7. Configurazione del port-forwarding per Prometheus (opzionale)

Questo approccio automatizzato garantisce la riproducibilità del deployment e semplifica la gestione dell'ambiente di sviluppo locale.