

1 Abstract

Il progetto **STAR** (Sistema di Tracciamento dello Spazio Aereo e Rotte) è una banca dati pensata per gestire e monitorare, in modo integrato, il traffico aereo sia civile che militare. Questo sistema segue tutte le fasi operative di un volo, dalla pianificazione della rotta e prenotazione degli slot negli aeroporti, fino alla storicizzazione delle operazioni effettuate e alla gestione dei dati telemetrici

La banca dati si concentra su tre aree principali:

- **Infrastruttura e Logistica:** Qui si gestiscono gli aeroporti, sia hub che regionali e militari, i gate e tutta la complessa logistica di carico merce (container) e passeggeri.
- **Flotta e Risorse Umane:** Questo aspetto si occupa in dettaglio degli aeromobili, con tutte le loro configurazioni, e del personale specializzato come piloti, controllori e manutentori, tenendo traccia delle loro abilitazioni, turni e certificazioni.
- **Sicurezza e Monitoraggio:** Archiviazione dei log operativi (rilevazioni GPS campionate, parametri tecnici e messaggi di errore) finalizzata alla manutenzione predittiva e alla gestione dei protocolli di sicurezza per le aree militari.

L'obiettivo è quello di supportare le decisioni per ottimizzare le risorse aeroportuali e garantire una completa tracciabilità degli eventi di volo e di manutenzione.

2 Analisi dei Requisiti

Questa sezione riassume i requisiti informativi richiesti dal sistema da sviluppare. L'obiettivo è descrivere i concetti principali, le loro caratteristiche rilevanti e le relazioni che intercorrono tra essi.

Aeroporti

Ogni aeroporto è identificato da un codice internazionale e contiene le seguenti informazioni:

- codice IATA;
- nome;
- città e nazione in cui si trova;
- coordinate GPS;
- numero di piste disponibili.
- numero di voli giornalieri.

Si tracciano il settore assegnato, data e ora di inizio, e data e ora di fine dei controllori di volo che presidiano un aeroporto. Gli aeroporti si suddividono in tre categorie:

- **Hub Internazionale**, caratterizzato dal numero di terminal presenti;
- **Regionale**, che presenta limitazioni operative, quali la lunghezza massima della pista e l'eventuale possibilità di operare in orario notturno;
- **Base Militare**, con codice NATO e livello minimo di sicurezza, oltre all'applicazione di specifici protocolli di sicurezza.

Un Hub Internazionale può inoltre possedere diversi gate, che rappresentano i punti fisici di imbarco.

Aerei

Ogni aereo è identificato da una matricola univoca e contiene:

- data di immatricolazione;
- ore di volo accumulate.

Gli aerei si suddividono in:

- **Aereo di Linea**, dotato di rete Wi-Fi e configurazioni di intrattenimento dedicate al trasporto passeggeri;
- **Aereo Cargo**, caratterizzato dal peso massimo di carico supportato;
- **Aereo Privato**, gestito per conto di un proprietario specifico, con eventuali servizi dedicati;
- **Aereo Militare**, utilizzato in operazioni governative, con un codice missione e un ente operativo.

Un aereo può svolgere contemporaneamente più ruoli (ad esempio: cargo privato, cargo militare).

Personale

Il personale rappresenta tutte le persone che operano nel contesto aeroportuale. Per ciascun dipendente sono registrati:

- identificativo univoco;
- nome e cognome;
- data di nascita;
- data di assunzione.

Il personale appartiene a una gerarchia parziale e disgiunta:

- **Pilota**, con numero di licenza, ore di volo e data dell'ultima visita medica, possiede un'abilitazione al volo per uno o più aerei, la quale ha una data di conseguimento e una di scadenza.
- **Controllore di Volo**, con livello e scadenza delle certificazioni abilitative;
- **Manutentore**, con qualifica tecnica e responsabilità di interventi e certificazioni (si traccia la data di scadenza della certificazione). Gestisce anche gli alert generati dai Log Errori, i quali hanno uno stato e una data di presa in carico.

Voli

Il volo rappresenta il concetto centrale del sistema. Ogni volo è identificato da un id univoco e registra:

- codice del volo;
- data e ora programmata di partenza;
- data e ora effettiva di partenza;
- stato operativo (programmato, in corso, atterrato, cancellato);
- peso totale del carico delle merci.

Il personale di bordo è gestito da un *Equipaggio* (si tracciano il ruolo e le ore di servizio), mentre i controllori di volo monitorano le fasi di un volo, tracciando quale fase si ha monitorato. Ogni volo può prenotare specifiche fasce orarie per il decollo e l'atterraggio, tracciare i propri dati di telemetria tramite log dedicati e viene associato a una rotta pianificata. Un aereo esegue uno specifico volo.

Log di Transito

I log di transito rappresentano i dati telemetrici generati durante un volo. Ogni rilevazione è associata a un singolo volo e a un istante temporale, e contiene informazioni quali altitudine e velocità. La gerarchia dei log è:

- **Log Sensore GPS**, contenente latitudine e longitudine;
- **Log Dati di Volo**, con livello carburante, temperatura e pressione;
- **Log Errori**, con codice errore, messaggio e livello di severità.

Fascia Oraria

Le fasce orarie rappresentano gli slot temporali gestiti dai singoli aeroporti destinati alle operazioni di decollo e atterraggio. Ogni fascia oraria contiene:

- identificativo dello slot;
- orario di inizio e fine;
- tipologia dello slot.

I voli possono prenotare fasce di decollo e fasce di atterraggio distinte.

Rotta Pianificata

Una rotta pianificata descrive un percorso standard e contiene:

- identificativo della rotta;
- nome descrittivo;
- durata stimata;
- distanza;
- consumo previsto di carburante.

Ogni volo segue una specifica rotta.

Container

I container rappresentano le unità di carico utilizzate per il trasporto merci. Per ciascun container sono registrati:

- codice identificativo;
- peso della tara;
- tipologia.

Sono utilizzati sia per il trasporto tramite aerei cargo, dove si traccia la posizione in stiva e la data di imbarco, sia per la registrazione delle merci imbarcate su un volo, dove invece si monitorano il peso registrato durante quel volo, la data di imbarco e il contenuto.

Classe Passeggeri e Servizi

La classe passeggeri rappresenta una categoria di servizio a bordo degli aerei di linea, e possiede un numero di posti a sedere differente, caratterizzata da:

- identificativo della classe;
- spazio per le gambe.

A ciascuna classe sono associati eventuali *Servizi Aggiuntivi*, ciascuno identificato da:

- nome del servizio;
- classe a cui appartiene.
- descrizione.

Tipo di Aereo e Componenti

Il tipo di aereo (modello) fornisce informazioni tecniche:

- codice del modello;
- costruttore;
- autonomia;
- velocità di crociera.

Ogni modello può essere dotato di componenti tecnici specifici, ciascuno caratterizzato da un numero di parte e una descrizione.

Compagnia Aerea

Le compagnie aeree operano negli aeroporti e sono descritte da:

- codice identificativo;
- nome;
- nazionalità;
- sito web.

Una compagnia può possedere diversi aerei e avere uno o più gate assegnati.

Gate

I gate rappresentano i punti fisici di imbarco e sbarco presenti esclusivamente negli *Hub Internazionali*. La loro esistenza dipende dall'hub cui appartengono.

Ogni gate registra:

- numero del gate (univoco solo all'interno dello stesso hub);
- piano in cui si trova il gate;
- presenza o meno del tunnel di imbarco (jetbridge).

Alcuni gate possono essere assegnati a specifiche compagnie aeree per l'utilizzo operativo.

Protocollo di Sicurezza

I protocolli di sicurezza si applicano alle basi militari e rappresentano le procedure operative obbligatorie da seguire. Ogni protocollo è caratterizzato da:

- identificativo del protocollo;
- nome;
- descrizione.

Le basi militari possono applicare uno o più protocolli, ciascuno con una data di inizio validità.

Componente

I componenti rappresentano gli elementi tecnici standard installabili su uno specifico modello di aereo, e sono identificati solo in relazione al tipo di aereo.

Ogni componente registra:

- numero di parte (univoco all'interno del modello);
- descrizione tecnica;

I componenti definiscono la dotazione tecnica minima associata a ogni modello di aereo.

3 Progettazione concettuale

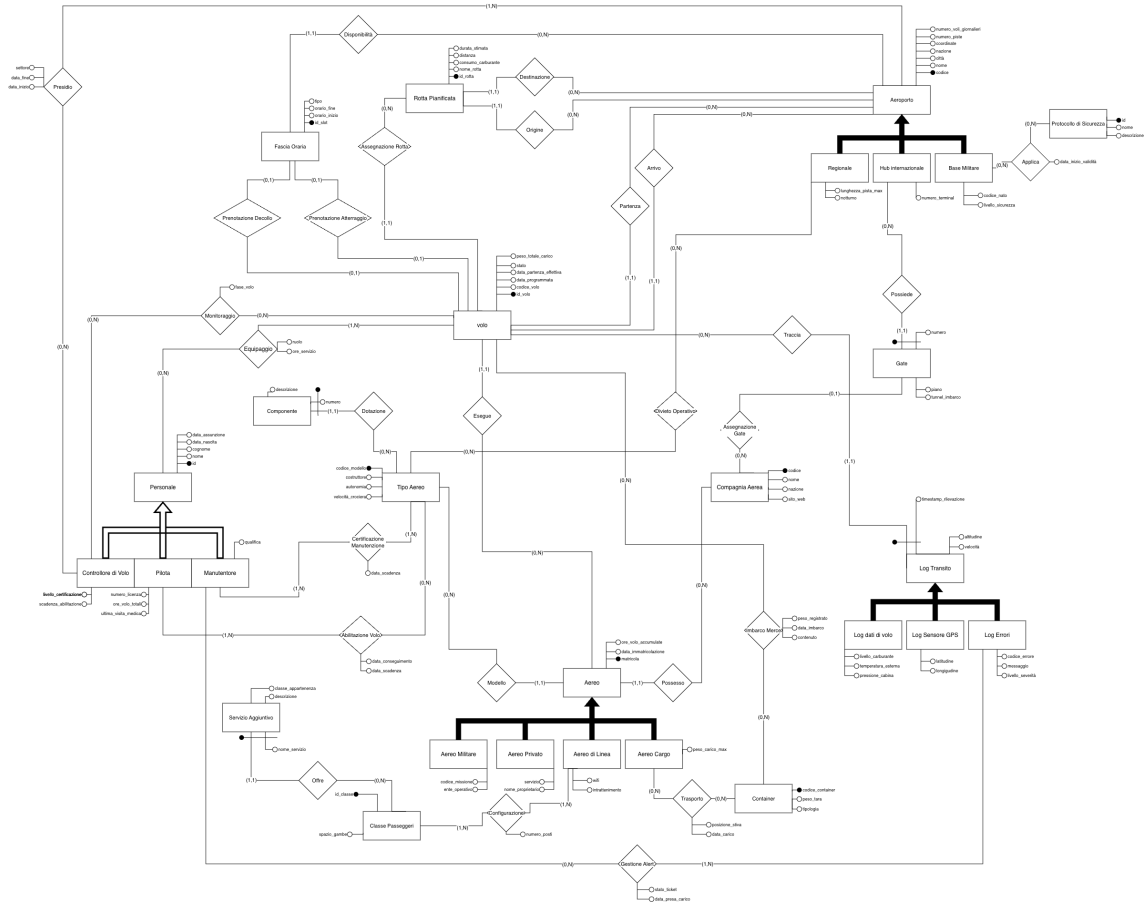


Figure 1: Diagramma Entità-Relazione del progetto STAR

La Figura 1 presenta il diagramma Entità-Relazione (E-R) che riassume i concetti emersi dall'analisi dei requisiti e le loro connessioni. Il sistema rappresenta una rete aeroportuale suddivisa in tre categorie di aeroporti: Hub Internazionali, Aeroporti Regionali e Basi Militari. Questa classificazione forma una gerarchia totale e disgiunta, quindi ogni aeroporto deve appartenere, in modo esclusivo, a una di queste categorie. Gli Hub Internazionali comprendono anche diversi Gate, che sono modellati come entità deboli, identificati dalla coppia (codice, numero). Un altro elemento chiave del dominio riguarda gli Aerei, le cui specifiche tecniche derivano dall'entità Tipo Aereo, che include il catalogo dei modelli registrati nel sistema. Gli aerei sono organizzati tramite una generalizzazione totale e sovrapposta, differenziando tra Aerei di Linea, Aerei Cargo, Aerei Privati e Aerei Militari. Questa scelta di modellazione riflette che un singolo velivolo può operare in più ruoli contemporaneamente, come nel caso di configurazioni combinate passeggeri-cargo o di freighter utilizzati in contesti militari. Gli Aerei di Linea hanno anche una Configurazione interna, definita rispetto all'entità Classe Passeggeri, che rappresenta le varie categorie di servizio disponibili a bordo (per esempio, Economy o Business). A ciascuna classe possono essere associati uno o più Servizi Aggiuntivi, modellati come entità deboli identificate dalla coppia (id_classe, nome_servizio). La gestione operativa dei voli è affidata all'entità Volo, che rappresenta l'evento centrale del sistema. Le relazioni di Partenza e Arrivo collegano ogni volo rispettivamente all'aeroporto di partenza e quella di destinazione. Ogni volo è effettuato da un singolo aereo tramite la relazione Esegue ed è monitorato da uno o più Controllori di Volo attraverso la relazione Monitoraggio. L'entità Personale descrive le risorse umane coinvolte nelle operazioni aeroportuali ed è organizzata in una generalizzazione parziale e disgiunta nelle sottoclassi Pilota, Controllore di Volo e Manutentore. Durante l'esecuzione di un volo, vengono registrati i Log di Transito, modellati come entità deboli identificate dalla coppia (id_volo, timestamp_rilevazione). La gerarchia è totale e disgiunta e include tre tipi di log: Log Sensore GPS, Log Dati di Volo e Log Errori. I log d'errore possono

generare notifiche per i manutentori tramite la relazione Gestione Alert. Per quanto riguarda la gestione delle merci, l'entità Container rappresenta le unità di carico trasportate nel sistema. La relazione Imbarco Merce associa ogni container ai voli sui quali viene caricato, registrando peso e contenuto dell'operazione. La relazione Trasporto consente di ricostruire la cronologia dei container movimentati da ciascun aereo cargo, indipendentemente dai voli. L'entità Rotta Pianificata descrive i collegamenti standard tra aeroporti e viene associata ai voli tramite la relazione Assegnazione Rotta. La Tabella 1, che trovi nella sezione successiva, riassume tutte le entità e relazioni illustrate nello schema E-R, indicando attributi e identificatori.

Vincoli non rappresentabili nello schema E-R

Alcune regole del dominio non possono essere rappresentate direttamente nel diagramma E-R, ma costituiscono comunque vincoli fondamentali del sistema. Tra i principali:

- **Un aereo classificato come Militare non può essere posseduto da una compagnia aerea commerciale.** Lo schema consente la relazione *Possesso* con qualsiasi aereo, ma il dominio richiede il vincolo:

$$a \in \text{Aereo Militare} \Rightarrow \neg \exists c \text{ Possesso}(c, a).$$

- **Un container può essere imbarcato su un volo solo se il peso registrato non supera la capacità di carico dell'aereo che esegue quel volo.** Questo vincolo incrocia attributi e relazioni diverse (*ImbarcoMerce*, *Esegue*, *AereoCargo*) ed è quindi non rappresentabile graficamente:

$$\text{Imbarco Merce}(c, v) \Rightarrow \text{peso_registrato}(c, v) \leq \text{peso_carico_max}(\text{Esegue}(v)).$$

- **Un controllore di volo può monitorare un volo solo se è assegnato a un aeroporto coerente con quel volo.** In particolare, se un controllore monitora un volo, deve presidiare almeno uno degli aeroporti di partenza o arrivo:

$$\text{Monitoraggio}(p, v) \Rightarrow \exists a (\text{Presidio}(p, a) \wedge (a = \text{Partenza}(v) \vee a = \text{Arrivo}(v))).$$

- **La gestione degli errori dipende dallo stato del ticket.** In particolare, uno stato diverso da “non assegnato” richiede che esista almeno un manutentore associato tramite *Gestione Alert*. Il legame tra stato del log e presenza di un manutentore non è esprimibile nel solo schema E-R.
- **Un membro dell'equipaggio può operare come Pilota solo se è abilitato al modello dell'aereo che esegue il volo.** Questo vincolo incrocia *Equipaggio*, *Pilota*, *AbilitazioneVolo*, *Esegue* e *TipoAereo*:

$$\text{Equipaggio}(p, v) \wedge \text{Ruolo}(p, v) = \text{“Pilota”} \Rightarrow \exists t (\text{Abilitazione Volo}(p, t) \wedge t = \text{Tipo Aereo}(\text{Esegue}(v))).$$

Entità	Descrizione	Attributi	Identificatore
Aeroporto	Struttura aeroportuale	codice, nome, città, nazione, coordinate, numero_piste, numero_voli_giornalieri	codice
HubInternazionale	Tipo di aeroporto	numero_terminal	
AeroportoRegionale	Tipo di aeroporto	lunghezza_pista_max, notturno	
BaseMilitare	Aeroporto militare	codice_nato, livello_sicurezza	
Gate	Punto di imbarco	numero, piano, tunnel_imbarco	(codice, numero)
ProtocolloSicurezza	Procedure militari	id, nome, descrizione	id
Aereo	Velivolo	matricola, data_immatricolazione, ore_volo_accumulate	matricola
AereoDiLinea	Sottotipo aereo	wifi, intrattenimento	
AereoCargo	Sottotipo aereo	volume_carico_max	
AereoPrivato	Sottotipo aereo	nome_proprietario, servizio	
AereoMilitare	Sottotipo aereo	codice_missione, ente_operativo	
TipoAereo	Catalogo modelli	codice_modello, costruttore, autonomia, velocita_crociera	codice_modello
Componente	Componenti tecnici standard	numero, descrizione	(codice_modello, numero)
Personale	Risorse umane	id, nome, cognome, data_nascita, data_assunzione	id
Pilota	Sottoclasse personale	numero_licenza, ore_volo_totali, ultima_visita_medica	
ControlloreVolo	Sottoclasse personale	livello_certificazione, scadenza_abilitazione	
Manutentore	Sottoclasse personale	qualifica	
Volo	Evento operativo	id_volo, codice_volo, data_programmata, data_partenza_effettiva, stato, peso_totale_carico	id_volo
LogTransito	Rilevazioni telemetriche	timestamp, altitudine, velocità	(id_volo, timestamp)
LogGPS	Sottotipo log	latitudine, longitudine	
LogDatiVolo	Sottotipo log	livello_carburante, temperatura_esterna, pressione_cabina	
LogErrori	Sottotipo log	codice_errore, messaggio, livello_severità	
FasciaOraria	Slot aeroportuali	id_slot, orario_inizio, orario_fine, tipo	id_slot
RottaPianificata	Percorso standard	id_rota, nome_rota, consumo_carburante, distanza, durata_stimata	id_rota
Container	Unità di carico	codice_container, peso_tara, tipologia	codice_container
ClassePasseggeri	Categoria servizio	id_classe, spazio_gambe	id_classe
ServizioAggiuntivo	Servizi associati alle classi	nome_servizio, descrizione, classe_appartenenza	(nome_servizio, id_classe)
CompagniaAerea	Operatore aeroportuale	codice, nome, nazione, sito_web	codice

Table 1: Entità individuate dall’analisi dei requisiti, con attributi e identificatori

Relazione	Descrizione	Componente	Attributi
Possiede	Un Hub Internazionale possiede uno o più gate	Hub internazionale, Gate	–
Applica	Una base militare applica protocolli di sicurezza	BaseMilitare, ProtocolloSicurezza	data_inizio_validità
DivietoOperativo	Un aeroporto regionale vieta certi tipi di aereo	Regionale, TipoAereo	–
Esecuzione	Un aereo esegue un volo	Aereo, Volo	–
Partenza	Un volo parte da un aeroporto	Volo, Aeroporto	–
Arrivo	Un volo arriva in un aeroporto	Volo, Aeroporto	–
AssegnazioneRotta	Una rotta viene associata a un volo	RottaPianificata, Volo	–
PrenotazioneDecollo	Un volo prenota uno slot di decollo	Volo, FasciaOraria	–
PrenotazioneAtterraggio	Un volo prenota uno slot di atterraggio	Volo, FasciaOraria	–
Equipaggio	Piloti e assistenti operano su un volo	Personale, Volo	ruolo, ore_servizio
Monitoraggio	Un controllore supervisiona un volo	ControlloreVolo, Volo	fase_volo
Presidio	Un controllore è assegnato a un aeroporto	ControlloreVolo, Aeroporto	settore, data_fine, data_inizio
Traccia	Un volo genera log di transito	Volo, LogTransito	–
GestioneAlert	Un manutentore gestisce un log di errore	Manutentore, LogErrori	stato_ticket, data_presa_carico
ImbarcoMerce	Un container è imbarcato su un volo	Container, Volo	peso_registrato, data_imbarco, contenuto
Trasporto	Uno storico dei container trasportati da un aereo cargo	AereoCargo, Container	data_carico, posizione_stiva
Configurazione	Una classe passeggeri è configurata su un aereo di linea	AereoDiLinea, ClassePasseggeri	numero_posti
Dotazione	Componenti tecniche installate su un modello di aereo	TipoAereo, Componente	–
AbilitazioneVolo	Un pilota è abilitato a un modello di aereo	Pilota, TipoAereo	data_conseguimento, data_scadenza
AssegnazioneGate	Una compagnia aerea ha uno o più gate assegnati	CompagniaAerea, Gate	–
Possesso	Una compagnia possiede uno o più aerei	CompagniaAerea, Aereo	–
CertificazioneManutenzione	Un manutentore certifica un aereo dopo un intervento	Manutentore, Aereo	data_scadenza
Modello	Un aereo è associato a un modello tecnico	Aereo, TipoAereo	–
Offre	Una classe passeggeri include un servizio aggiuntivo	ClassePasseggeri, ServizioAggiuntivo	–
Origine	Una rotta pianificata ha un aeroporto di partenza	RottaPianificata, Aeroporto	–
Destinazione	Una rotta pianificata ha un aeroporto di arrivo	RottaPianificata, Aeroporto	–
Disponibilità	Una fascia oraria è disponibile in un aeroporto	FasciaOraria, Aeroporto	–

Table 2: Relazioni individuate nello schema concettuale, con componenti e attributi.

4 Progettazione Logica

Nel paragrafo che segue, parleremo del processo di ristrutturazione dello schema concettuale. L'obiettivo principale è rendere la rappresentazione dei dati più efficace, eliminando i valori nulli che non servono e preparando lo schema per la traduzione nel formato relazionale. Iniziamo con un'analisi delle ridondanze nel modello, per capire quali elementi tenere e quali è meglio togliere. Dopo, ci occuperemo di rimuovere le generalizzazioni. Alla fine, presenteremo lo schema E-R ristrutturato in base a questi criteri.

4.1 Analisi delle Ridondanze

Ridondanza 1: *numero_voli_giornalieri* in Aeroporto

L'attributo *numero_voli_giornalieri* nell'entità **Aeroporto** rappresenta il numero di voli (in partenza o in arrivo) associati ad uno specifico aeroporto in una determinata data. Tale informazione può essere ottenuta calcolando dinamicamente il numero di voli collegati tramite le relazioni **Partenza(Aeroporto,Volo)** e **Arrivo(Aeroporto,Volo)**.

Tuttavia, il conteggio dei voli giornalieri comporta un costo elevato, poiché ogni aeroporto può avere migliaia di voli al giorno. Per questo motivo si valuta la convenienza di mantenere l'attributo ridondante *NumeroVoliGiornalieri* rispetto al ricalcolo continuo tramite query.

Consideriamo le seguenti operazioni tipiche:

- **Operazione 1 (50 al giorno):** inserimento di un nuovo volo pianificato;
- **Operazione 2 (10 000 al giorno):** consultazione del numero giornaliero di voli di un aeroporto.

I seguenti volumi sono considerati realistici per un sistema aeroportuale:

Concetto	Tipo	Volume
Aeroporto	E	120
Volo	E	80 000
Partenza/Arrivo	R	160 000

Analisi con ridondanza L'inserimento di un nuovo volo comporta:

- la creazione dell'entità **Volo**;
- l'inserimento delle due relazioni **Partenza** e **Arrivo**;
- la lettura e l'aggiornamento dell'attributo ridondante *numero_voli_giornalieri* nell'entità **Aeroporto**.

Concetto	Costrutto	Accessi	Tipo
Volo	E	1	$S \times 50$
Partenza	R	1	$S \times 50$
Arrivo	R	1	$S \times 50$
Aeroporto	E	1	$L \times 50$
Aeroporto	E	1	$S \times 50$

Table 3: Operazione 1 con ridondanza: inserimento nuovo volo.

Per la consultazione del numero di voli giornalieri:

Concetto	Costrutto	Accessi	Tipo
Aeroporto	E	1	$L \times 10\,000$

Table 4: Operazione 2 con ridondanza: consultazione del numero giornaliero di voli.

$$\text{Costo giornaliero} = 50 \times 9 + 10\,000 \times 1 = 450 + 10\,000 = 10\,450.$$

Analisi senza ridondanza In assenza dell'attributo ridondante, la consultazione giornaliera richiede di contare i voli connessi tramite **Partenza** e **Arrivo**. In media un aeroporto gestisce circa 800 voli al giorno.

L'inserimento di un nuovo volo richiede soltanto la registrazione dell'entità **VoLo** e delle relazioni **Partenza** e **Arrivo**:

Concetto	Costrutto	Accessi	Tipo
Volo	E	1	$S \times 50$
Partenza	R	1	$S \times 50$
Arrivo	R	1	$S \times 50$

Table 5: Operazione 1 senza ridondanza.

Per la consultazione:

Concetto	Costrutto	Accessi	Tipo
Aeroporto	E	1	$L \times 10\,000$
Partenza	R	800	$L \times 10\,000$
Arrivo	R	800	$L \times 10\,000$

Table 6: Operazione 2 senza ridondanza: conteggio dei voli giornalieri.

$$\text{Costo giornaliero} = 50 \times 6 + 10\,000 \times 1\,601 = 300 + 16\,010\,000 = 16\,010\,300.$$

Conclusione. La consultazione quotidiana, pari a 10 000 accessi, comporterebbe senza ridondanza circa 16 milioni di letture, rendendo l'operazione estremamente costosa. L'analisi suggerisce pertanto di **mantenere l'attributo ridondante numero_voli_giornalieri**, che ottimizza sensibilmente le interrogazioni frequenti a scapito di un modesto incremento nel costo di scrittura.

Ridondanza 2: *peso_totale_carico* in VoLo

Il peso totale delle merci caricate su un volo è un valore derivabile dalla relazione **Imbarco_Merce**. Per ogni coppia (c, v) (container–volo), tale relazione registra il valore *Peso_Registrato*. Pertanto:

$$\text{Peso_Totale_Carico}(v) = \sum_{c \in \text{Container}(v)} \text{Peso_Registrato}(c, v)$$

Si valuta se tenere l'attributo ridondante *Peso_Totale_Carico* nell'entità **VoLo**, aggiornato a ogni operazione di imbarco o sbarco.

Consideriamo le operazioni tipiche:

- **Operazione 1 (circa 50 al giorno):** inserimento o rimozione di un container da un volo;
- **Operazione 2 (circa 2 000 al giorno):** consultazione del peso totale del carico di un volo.

Assumiamo costi di accesso: $L=1$, $S=2$.

I volumi rilevanti del sistema sono:

Concetto	Tipo	Volume
Volo	E	8 000
Container	E	40 000
Imbarco_Merce	R	60 000

Con ridondanza. L'operazione di aggiornamento del peso totale richiede:

- aggiornare **Imbarco_Merce** (1S);
- leggere **VoLo** (1L) e aggiornarne *peso_totale_carico* (1S).

Concetto	Costrutto	Accessi	Tipo
Imbarco_Merce	R	1	$S \times 50$
Volo	E	1	$L \times 50$
Volo	E	1	$S \times 50$

Table 7: Operazione 1 con ridondanza: aggiornamento del peso totale.

Per la consultazione del peso totale:

Concetto	Costrutto	Accessi	Tipo
Volo	E	1	$L \times 2000$

Table 8: Operazione 2 con ridondanza: lettura diretta del valore.

$$\text{Costo giornaliero} = 50 \times (2 + 1 + 2) + 2000 \times 1 = 250 + 2000 = 2250.$$

Senza ridondanza. Ogni consultazione del peso richiede di:

- leggere il volo (1L);
- leggere tutti i container imbarcati: in media 20 per volo (20L);
- effettuare una somma su 20 valori.

Concetto	Costrutto	Accessi	Tipo
Imbarco_Merce	R	1	$S \times 50$

Table 9: Operazione 1 senza ridondanza.

Concetto	Costrutto	Accessi	Tipo
Volo	E	1	$L \times 2000$
Imbarco_Merce	R	20	$L \times 2000$

Table 10: Operazione 2 senza ridondanza: scansione dei container imbarcati.

Costo giornaliero senza ridondanza:

$$2000 \times (1 + 20) = 42000.$$

Conclusioni. Senza ridondanza, la consultazione comporta circa 42000 accessi al giorno, dovuti alla scansione dei container imbarcati. Con la ridondanza il costo scende a circa 2250 accessi. L'analisi indica chiaramente che conviene mantenere l'attributo ridondante *peso_totale_carico* nell'entità *Volo*.

4.2 Eliminazione delle Generalizzazioni

In questa sezione si eliminano le generalizzazioni identificate nella Progettazione Concettuale. L'obiettivo è quello di arrivare a uno schema che non contenga costrutti che non si possano tradurre in un modello relazionale. Togliere le generalizzazioni aiuta a ridurre gli attributi che non si possono applicare e assicura una gestione corretta delle chiavi e dei vincoli di integrità.

Le generalizzazioni presenti nel nostro schema riguardano:

- **Aeroporto**, suddiviso in Hub Internazionale, Aeroporto Regionale e Base Militare;
- **Aereo**, suddiviso in Aereo di Linea, Aereo Cargo, Aereo Privato e Aereo Militare;
- **Personale**, suddiviso in Pilota, Controllore di Volo e Manutentore;
- **Log di Transito**, suddiviso in Log Dati di Volo, Log Sensori GPS e Log Errori.

Le modalità con cui tali generalizzazioni vengono eliminate sono descritte qui di seguito.

Aeroporto La generalizzazione su **Aeroporto** è *totale e disgiunta*, dato che ogni aeroporto deve appartenere esclusivamente a una delle tre categorie previste.

Sebbene per una gerarchia totale e disgiunta la strategia ottimale sarebbe l'accorpamento degli attributi del padre nelle entità figlie, tale approccio risulterebbe impraticabile nel nostro contesto. L'entità **Aeroporto** è infatti coinvolta in numerose relazioni (Partenza, Arrivo, Presidio, Origine, Destinazione, Disponibilità), e la sua eliminazione richiederebbe la triplicazione di tutte queste associazioni, complicando significativamente lo schema e le operazioni di interrogazione.

Si adotta quindi la strategia di mantenimento dell'entità padre **Aeroporto**, collegandola alle tre entità figlie **HubInternazionale**, **Regionale** e **BaseMilitare** tramite relazioni di identificazione. Ogni aeroporto mantiene gli attributi comuni nell'entità padre, mentre gli attributi specifici sono registrati nelle rispettive entità figlie. Questa soluzione centralizza le relazioni e semplifica le query, richiedendo però l'implementazione di vincoli applicativi per garantire che ogni aeroporto appartenga a esattamente una categoria.

Aereo La generalizzazione su **Aereo** è *totale e sovrapposta*, poiché un aeromobile può svolgere contemporaneamente più ruoli operativi (ad esempio, un aereo cargo impiegato anche come velivolo militare).

Proprio a causa della natura sovrapposta, è indispensabile mantenere l'entità padre **Aereo**, che contiene gli attributi comuni (matricola, data_immatricolazione, ore_volo_accumulate). Le specializzazioni sono rappresentate tramite entità separate **AereoDiLinea**, **AereoCargo**, **AereoPrivato** e **AereoMilitare**, ciascuna collegata al padre tramite la matricola (chiave primaria e contemporaneamente chiave esterna).

Questa soluzione consente di associare un singolo aereo a più categorie simultaneamente, inserendo la stessa matricola in più tabelle figlie, evitando duplicazioni degli attributi comuni e garantendo coerenza nei dati condivisi. L'alternativa di eliminare il padre introdurrebbe gravi ridondanze e complessità nella gestione degli aeromobili multi-ruolo.

Personale La generalizzazione su **Personale** è *parziale e disgiunta*. Non tutti i membri del personale ricoprono ruoli specializzati, e ciascun dipendente può appartenere al massimo a una sola delle categorie previste (pilota, controllore o manutentore).

Si mantiene l'entità padre **Personale**, contenente gli attributi comuni a tutto il personale (identificativo, nome, cognome, date di nascita e assunzione), e si creano tre entità figlie **Pilota**, **ControlloreVolo** e **Manutentore**, collegate al padre tramite l'identificativo.

La parzialità della gerarchia impone il mantenimento del padre: esistono infatti membri del personale (ad esempio, personale amministrativo o di supporto) che non appartengono ad alcuna specializzazione. La disgiunzione garantisce che nessun dipendente possa ricoprire simultaneamente più ruoli specializzati, mantenendo la separazione tra le competenze e le responsabilità operative.

Log di Transito La generalizzazione su **LogTransito** è *totale e disgiunta*. Ogni rilevazione telemetrica deve appartenere obbligatoriamente a una sola delle tre categorie: GPS, dati di volo o errori.

Per questa gerarchia si adotta l'approccio dell'*accorpamento nelle entità figlie*, eliminando l'entità padre e creando tre entità indipendenti: **LogGPS**, **LogDatiVolo** e **LogErrori**. Ciascuna entità contiene sia gli attributi comuni (id_log, id_volo, timestamp, altitudine, velocità) sia quelli specifici della propria tipologia (ad esempio, latitudine e longitudine per i log GPS, o codice_errore e severità per i log di errore).

Questa scelta è motivata dal numero limitato di relazioni coinvolte (principalmente la relazione **GestioneAlert** per i soli log di errore) e dai vantaggi in termini di assenza di valori nulli, prestazioni ottimizzate nelle query e semplicità dei vincoli di integrità. Ogni tipo di log può essere gestito indipendentemente senza necessità di join o discriminanti.

Il diagramma E-R ristrutturato tiene conto di queste modifiche.

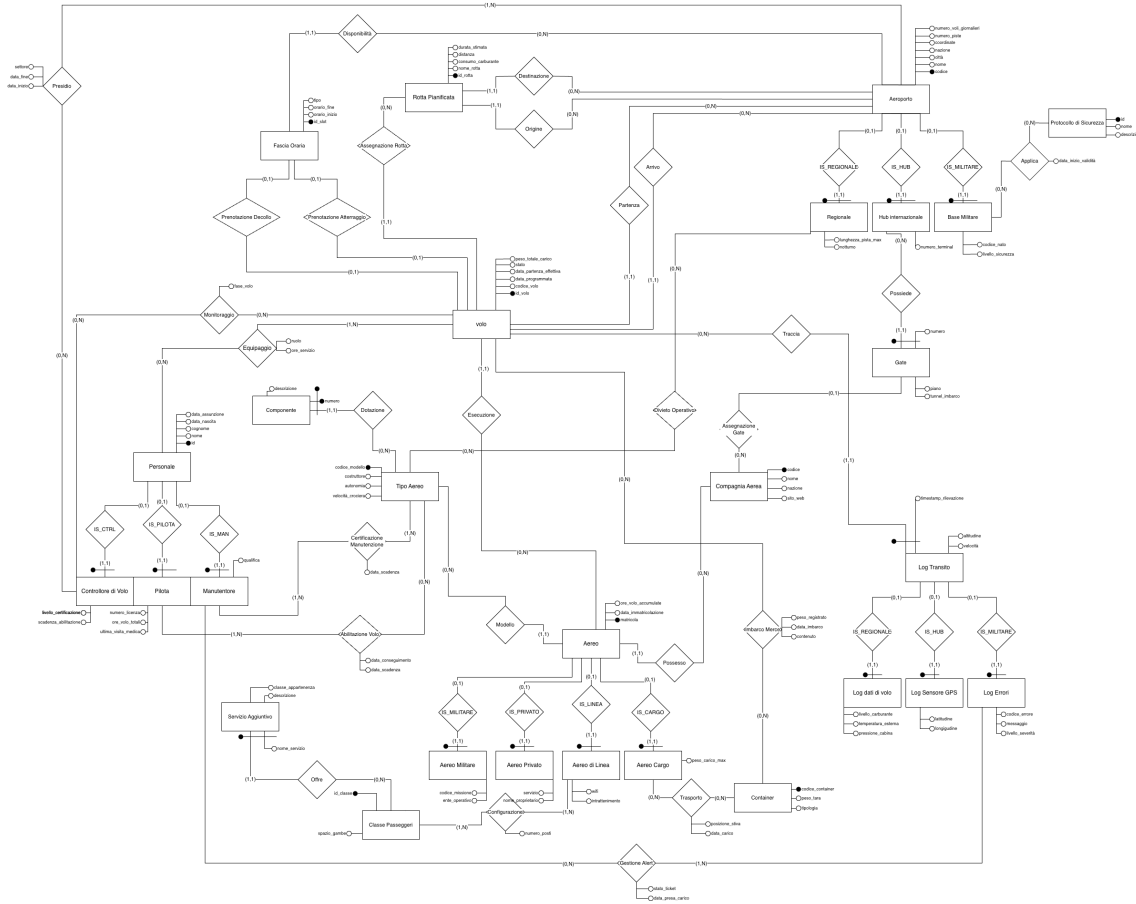


Figure 2: Diagramma Entità-Relazione del progetto STAR

4.3 Schema Relazionale

Lo schema ristrutturato contiene esclusivamente costrutti direttamente mappabili nel modello relazionale. Di seguito viene riportato lo schema logico completo, dove l'asterisco (*) denota gli attributi che possono assumere valori nulli.

- **Aeroporto**(codice, nome, città, nazione, coordinate, numero_piste, numero_voli_giornalieri)
- **HubInternazionale**(codice, numero_terminal) codice → Aeroporto(codice)
- **Regionale**(codice, lunghezza_max_pista, notturno) codice → Aeroporto(codice)
- **BaseMilitare**(codice, codice_nato, livello_sicurezza) codice → Aeroporto(codice)
- **ProtocolloSicurezza**(id_protocollo, nome, descrizione*)
- **Applica**(codice, id_protocollo, data_inizio) codice → BaseMilitare(codice) id_protocollo → ProtocolloSicurezza(id_protocollo)
- **Gate**(codice_hub, numero_gate, piano, tunnel) codice_hub → HubInternazionale(codice)
- **TipoAereo**(id_tipo, costruttore, autonomia, velocita_crociera)
- **Componente**(id_tipo, numero_parte, descrizione) id_tipo → TipoAereo(id_tipo)
- **Aereo**(matricola, data_immatricolazione, ore_volo_accumulate, id_tipo) id_tipo → TipoAereo(id_tipo)
- **AereoDiLinea**(matricola, wifi, intrattenimento*) matricola → Aereo(matricola)
- **AereoCarga**(matricola, volume_carico_max) matricola → Aereo(matricola)
- **AereoPrivato**(matricola, proprietario, servizi_inclusi*) matricola → Aereo(matricola)

- **AereoMilitare**(matricola, codice_missione*, ente_operativo) matricola → Aereo(matricola)
- **CompagniaAerea**(codice, nome, nazione, sito_web*)
- **Possesso**(codice_compagnia, matricola) codice_compagnia → CompagniaAerea(codice)
matricola → Aereo(matricola)
- **AssegnazioneGate**(codice_compagnia, codice_hub, numero_gate) codice_compagnia → CompagniaAerea(codice) (codice_hub, numero_gate) → Gate(codice_hub, numero_gate)
- **Personale**(id_personale, nome, cognome, data_nascita, data_assunzione)
- **Pilota**(id_personale, numero_licenza, ore_volo, ultima_visita) id_personale → Personale(id_personale)
- **ControlloreVolo**(id_personale, livello_certificazione, scadenza_abilitazione) id_personale → Personale(id_personale)
- **Manutentore**(id_personale, qualifica) id_personale → Personale(id_personale)
- **AbilitazioneVolo**(id_personale, id_tipo, data_conseguimento, data_scadenza) id_personale → Pilota(id_personale) id_tipo → TipoAereo(id_tipo)
- **RottaPianificata**(id_rotta, nome, distanza, durata_stimata, consumo_previsto, aeroporto_origine, aeroporto_destinazione) aeroporto_origine → Aeroporto(codice) aeroporto_destinazione → Aeroporto(codice)
- **FasciaOraria**(id_slot, codice, ora_inizio, ora_fine, tipologia, stato_slot) codice → Aeroporto(codice)
- **Volo**(id_volo, codice_volo, data_ora_programmata, data_ora_effettiva*, stato, peso_totale_carico, matricola, aeroporto_partenza, aeroporto_arrivo, id_rotta, slot_decollo*, slot_atterraggio*)
matricola → Aereo(matricola) aeroporto_partenza → Aeroporto(codice) aeroporto_arrivo → Aeroporto(codice) id_rotta → RottaPianificata(id_rotta) slot_decollo → FasciaOraria(id_slot) slot_atterraggio → FasciaOraria(id_slot)
- **Equipaggio**(id_personale, id_volo, ruolo, ore_servizio) id_personale → Personale(id_personale)
id_volo → Volo(id_volo)
- **Monitoraggio**(id_personale, id_volo, fase_volo) id_personale → ControlloreVolo(id_personale)
id_volo → Volo(id_volo)
- **Presidio**(id_personale, codice, data_inizio, data_fine*, settore) id_personale → ControlloreVolo(id_personale) codice → Aeroporto(codice)
- **Container**(codice_container, peso_tara, tipologia)
- **ImbarcoMerce**(id_volo, codice_container, peso_registrato, data_imbarco, contenuto*) id_volo → Volo(id_volo) codice_container → Container(codice_container)
- **Trasporto**(matricola, codice_container, data_carico, posizione_stiva) matricola → AereoCargo(matricola) codice_container → Container(codice_container)
- **ClassePasseggeri**(id_classe, spazio_gambe)
- **Configurazione**(matricola, id_classe, numero_posti) matricola → AereoDiLinea(matricola)
id_classe → ClassePasseggeri(id_classe)
- **ServizioAggiuntivo**(id_classe, nome_servizio, descrizione*) id_classe → ClassePasseggeri(id_classe)
- **LogGPS**(id_log, id_volo, timestamp, altitudine, velocita, latitudine, longitudine) id_volo → Volo(id_volo)
- **LogDatiVolo**(id_log, id_volo, timestamp, altitudine, velocita, livello_carburante, pressione, temperatura) id_volo → Volo(id_volo)

- **LogErrori**(id_log, id_volo, timestamp, altitudine, velocita, codice_errore, messaggio*, severita)
id_volo \rightarrow Volo(id_volo)
- **GestioneAlert**(id_personale, id_log, stato, data_presa_carico*) id_personale \rightarrow Manutentore(id_personale) id_log \rightarrow LogErrori(id_log)
- **CertificazioneManutenzione**(id_personale, matricola, data_certificazione, data_scadenza)
id_personale \rightarrow Manutentore(id_personale) matricola \rightarrow Aereo(matricola)