

1 Abstract

Il progetto **STAR** (Sistema di Tracciamento dello Spazio Aereo e Rotte) è un Sistema Informativo pensato 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 descrive i concetti informativi rilevanti del sistema e gli attributi principali associati a ciascuna entità.

Aeroporti

Un aeroporto è identificato da un codice IATA e presenta: nome, città, nazione, coordinate GPS, numero di piste e numero di voli giornalieri. Si registrano inoltre le informazioni relative ai controllori di volo assegnati (settore, data e ora di inizio e fine turno). Gli aeroporti sono classificati in Hub Internazionali, con numero di terminal; Aeroporti Regionali, con lunghezza massima della pista e possibilità di operare in orario notturno; Basi Militari, con codice NATO e livello minimo di sicurezza. Gli Hub possono includere più gate, mentre gli aeroporti Regionali possono avere limitazioni sulla tipologia di aereo.

Aerei

Ogni aereo è identificato da una matricola e regista data di immatricolazione e ore totali di volo. Gli aerei sono classificati in Aerei di Linea (con servizi come Wi-Fi e intrattenimento), Aerei Cargo (con un peso massimo di carico), Aerei Privati (con proprietario e servizi dedicati) e Aerei Militari (con codice missione ed ente operativo).

Personale

Per ogni membro del personale sono registrati identificativo, nome, cognome, data di nascita e data di assunzione. Le specializzazioni includono: il Pilota, con numero di licenza, ore di volo, ultima visita e abilitazioni di volo per i vari modelli di aereo (le quali includono la data di conseguimento e la data di scadenza); Controllore di Volo, che possiede il livello di certificazione e la scadenza dell'abilitazione; e il Manutentore, con qualifica e possibilità di effettuare manutenzioni e quindi rilasciare certificati di avvenuta manutenzione. Questi certificati hanno una data di scadenza. I Manutentori inoltre, gestiscono gli alert generati dai log di Errore, i quali presentano uno stato (creato, risolto, ..) e una data di presa in carico.

Voli

Ogni volo è descritto mediante identificativo, codice del volo, data e ora di partenza programmata, data e ora di partenza effettiva, stato operativo e peso totale del carico. Si registrano i membri dell'equipaggio (ruolo, ore di servizio), le fasi di volo monitorate dai controllori, le fasce orarie prenotate per decollo e atterraggio e la rotta pianificata. Ogni volo è eseguito da un singolo aereo.

Log di Transito

Per ogni rilevazione telemetrica sono registrati identificativo del volo che ha generato il Log, timestamp, altitudine e velocità. Sono previsti tre tipi di log: rilevazioni GPS (latitudine e longitudine), dati di volo (livello carburante, temperatura, pressione) ed errori (codice, messaggio e severità), utilizzati nella gestione operativa della manutenzione.

Fascia Oraria

Ogni slot operativo comprende l'orario di inizio e fine e tipologia. I voli possono prenotare separatamente gli slot di decollo e di atterraggio. Ogni fascia oraria si intende di uno specifico aeroporto, classificata tramite identificativo dello slot.

Rotta Pianificata

Una rotta pianificata è descritta da identificativo, nome, durata stimata, distanza e consumo previsto di carburante, oltre all'aeroporto di origine e di destinazione.

Container

Ogni container registra codice identificativo, peso tara e tipologia. Si conservano inoltre le informazioni relative alla data di carico e ai dati relativi al peso registrato e al contenuto quando imbarcato su un volo.

Classe Passeggeri e Servizi

Le classi passeggeri presentano un identificativo, il nome commerciale (es. Economy), la priorità di imbarco, e una descrizione. In ogni configurazione di aereo di linea, hanno un numero di posti e lo spazio per le gambe offerto. Ogni classe Passeggeri può offrire un servizio aggiuntivo, compreso di nome e descrizione.

Tipo di Aereo e Componenti

Ogni modello di aereo presenta codice, costruttore, autonomia e velocità di crociera. I componenti tecnici associati a ciascun modello sono descritti tramite numero di parte e descrizione.

Compagnia Aerea

Ogni compagnia aerea è caratterizzata da codice identificativo, nome, nazionalità e sito web. Può possedere più aerei e avere uno o più gate assegnati.

Gate

I gate degli hub internazionali sono descritti tramite numero, piano e presenza del tunnel di imbarco. Possono essere assegnati a specifiche compagnie aeree.

Protocollo di Sicurezza

Ogni protocollo applicabile alle basi militari registra identificativo, nome e descrizione, oltre alla data di inizio validità.

3 Progettazione concettuale

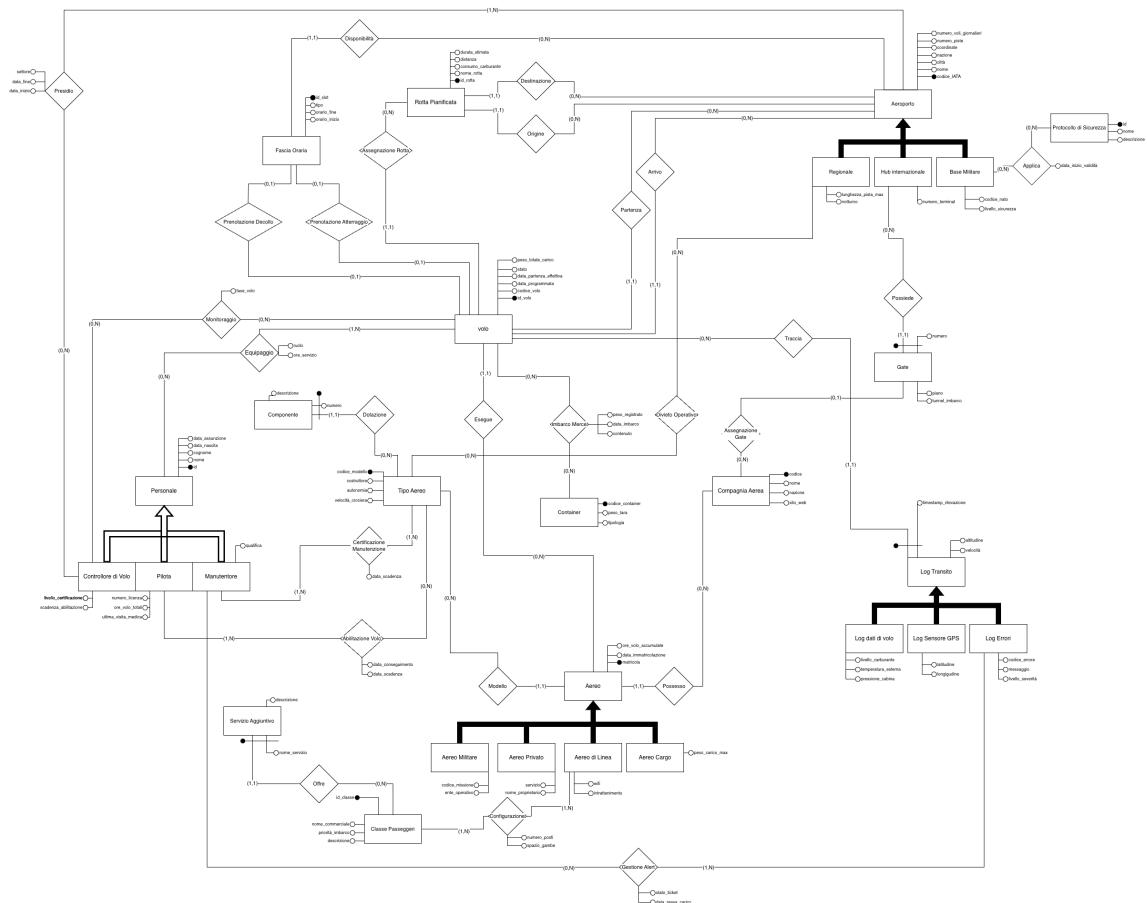


Figure 1: Diagramma Entità-Relazione del progetto STAR

La Figura 1 mostra il diagramma Entità-Relazione (E-R) creato sulla base dell'analisi dei requisiti. Il sistema rappresenta una rete aeroportuale, suddivisa in tre categorie: Hub Internazionali, Aeroporti Regionali e Basi Militari. Questa classificazione crea una gerarchia totale e disgiunta, poiché ogni aeroporto deve appartenere esclusivamente a una di queste categorie. Gli Hub Internazionali includono diversi Gate, che sono modellati come entità deboli e identificati dalla coppia (codice_IATA, numero). Le specifiche tecniche di ciascun aereo sono gestite dall'entità Tipo Aereo, che rappresenta il catalogo degli aerei del sistema e sono organizzati tramite una generalizzazione totale e sovrapposta, con le categorie Aerei di Linea, Aerei Cargo, Aerei Privati e Aerei Militari. Un velivolo può avere più ruoli contemporaneamente, come nel caso di configurazioni miste passeggeri-cargo o di freighter usati in ambito militare. 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 (ad esempio, Economy o Business). A ciascuna classe possono essere associati uno o più Servizi Aggiuntivi, modellati come entità deboli indicate dalla coppia (id_classe, nome_servizio). L'entità Volo rappresenta la gestione di tutti i singoli voli, ed è l'evento centrale del sistema. Le relazioni di Partenza e Arrivo collegano ogni volo rispettivamente all'aeroporto di partenza e a quello di destinazione. Anche se la rotta pianificata indica l'itinerario previsto, mantenere relazioni dirette sul volo è essenziale per registrare l'evento reale, assicurando la coerenza del dato anche in caso di variazioni operative (come dirottamenti o atterraggi di emergenza) o per voli specifici (militari o privati) che non seguono una rotta standard. Ogni volo è effettuato da un singolo aereo tramite la relazione Esegue ed è sorvegliato 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 un volo, si registrano i Log di Transito, cioè entità deboli identificate dalla coppia (id_volo, timestamp_rilevazione). Questa gerarchia è totale e disgiunta e comprende 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. L'entità Rotta Pianificata descrive i collegamenti standard tra aeroporti e viene associata ai voli tramite la relazione Assegnazione Rotta. La Tabella 1 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:

$$a \in AereoMilitare \Rightarrow \neg \exists c \text{ Possesso}(c, a)$$

- 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:

$$\text{ImbarcoMerce}(c, v) \Rightarrow \text{peso_registrato}(c, v) \leq \text{peso_carico_max}(\text{Esegue}(v))$$

- 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:

$$\text{Equipaggio}(p, v) \wedge \text{Ruolo}(p, v) = "Pilota" \Rightarrow \exists t \text{ AbilitazioneVolo}(p, t) \wedge t = \text{TipoAereo}(\text{Esegue}(v))$$

- **Coerenza tra Rotta e Volo.** Se a un volo è assegnata una rotta pianificata, gli aeroporti di partenza e arrivo registrati nel volo devono coincidere con l'origine e la destinazione previste dalla rotta (salvo eccezioni operative gestite a livello applicativo).

$$\text{AssegnazioneRotta}(v, r) \Rightarrow (\text{Partenza}(v) = \text{Origine}(r)) \wedge (\text{Arrivo}(v) = \text{Destinazione}(r))$$

- **Coerenza Slot-Aeroporto.** Un volo può prenotare uno slot (di decollo o atterraggio) solo se tale fascia oraria appartiene all'aeroporto previsto per quell'operazione. Ad esempio, per il decollo:

$$\text{PrenotazioneDecollo}(v, s) \wedge \text{FasciaOraria}(s, a) \Rightarrow \text{Partenza}(v) = a$$

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.

Entità	Descrizione	Attributi	Identificatore
Aeroporto	Struttura aeroportuale	codice_IATA, nome, città, nazione, coordinate, numero_piste, numero_voli_giornalieri	codice_IATA
HubInternazionale	Tipo di aeroporto	numero_terminal	
Regionale	Tipo di aeroporto	lunghezza_pista_max, notturno	
BaseMilitare	Aeroporto militare	codice_nato, livello_sicurezza	
Gate	Punto di imbarco	numero, piano, tunnel_imbarco	numero, Relazione "Possiede"
ProtocolloSicurezza	Procedure militari	id, nome, descrizione	id
Aereo	Velivolo	matricola, data_immatricolazione, ore_volo_accumulate	matricola
AereoDiLinea	Sottotipo aereo	wifi, intrattenimento	
AereoCargo	Sottotipo aereo	peso_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	numero, Relazione "Dotazione"
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_rilevazione, altitudine, velocità	timestamp_rilevazione, Relazione "Traccia"
LogGPS	Sottotipo log	latitudine, longitudine	
LogDatiVolo	Sottotipo log	livello_carburante, temperatura_esterna, pressione_cabina	
LogErrori	Sottotipo log	codice_errorre, messaggio, livello_severità	
FasciaOraria	Slot aeroportuali	id_slot, orario_inizio, orario_fine, tipo	id_slot
RottaPianificata	Percorso standard	id_rotta, nome_rotta, consumo_carburante, distanza, durata_stimata	id_rotta
Container	Unità di carico	codice_container, peso_tara, tipologia	codice_container
ClassePasseggeri	Catalogo Classi di viaggio	id_classe, nome_commerciale, priorità_imbarco, descrizione	id_classe
ServizioAggiuntivo	Servizi associati alle classi	nome_servizio, descrizione	nome_servizio, Relazione "Offre"
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 una 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註冊ato, data_imbarco, contenuto
Configurazione	Una classe passeggeri è configurata su un aereo di linea	AereoDiLinea, ClassePasseggeri	numero_posti, spazio_gambe
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.

4.1 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 × 50
Partenza	R	1	S × 50
Arrivo	R	1	S × 50
Aeroporto	E	1	L × 50
Aeroporto	E	1	S × 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 × 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 × 50
Partenza	R	1	S × 50
Arrivo	R	1	S × 50

Table 5: Operazione 1 senza ridondanza.

Per la consultazione:

Concetto	Costrutto	Accessi	Tipo
Aeroporto	E	1	L × 10 000
Partenza	R	800	L × 10 000
Arrivo	R	800	L × 10 000

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

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

Conclusioni. 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 × 50
Volo	E	1	L × 50
Volo	E	1	S × 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 × 2 000

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

$$\text{Costo giornaliero} = 50 \times (2 + 1 + 2) + 2 000 \times 1 = 250 + 2 000 = 2 250.$$

Senza ridondanza. Ogni consultazione del peso richiede di:

- leggere il volo (1L);
- leggere tutti i container imbarcati: in media 8 per volo (8L);
- effettuare una somma su 20 valori.

Concetto	Costrutto	Accessi	Tipo
Imbarco_Merce	R	1	S × 50

Table 9: Operazione 1 senza ridondanza.

Concetto	Costrutto	Accessi	Tipo
Volo	E	1	L × 2000
Imbarco_Merce	R	8	L × 2000

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

Costo giornaliero senza ridondanza:

$$50 \times 2 + 2000 \times (1 + 8) = 18\,100.$$

Conclusione. Senza ridondanza, la consultazione comporta circa 42 000 accessi al giorno, dovuti alla scansione dei container imbarcati. Con la ridondanza il costo scende a circa 2 250 accessi. L'analisi indica chiaramente che conviene mantenere l'attributo *ridondante peso_totale_carico* nell'entità Volo.

4.2 Eliminazione delle Generalizzazioni

In questa parte si eliminano le generalizzazioni individuate nella fase di Progettazione Concettuale. L'obiettivo è arrivare a uno schema che non contenga costrutti che non si possano tradurre in un modello relazionale, in modo da ridurre gli attributi che non si possono applicare e garantire una gestione corretta delle chiavi e dei vincoli di integrità.

Le generalizzazioni presenti nel nostro schema riguardano:

- **Aeroporto**, suddiviso in Hub Internazionale, 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, in teoria, sarebbe ideale accoppare gli attributi del padre nelle entità figlie, questo non è praticabile in questo contesto. L'entità Aeroporto è coinvolta in molte relazioni (Partenza, Arrivo, Presidio, Origine, Destinazione, Disponibilità), e toglierla comporterebbe la necessità di triplicare tutte queste associazioni, rendendo tutto molto più complesso. Dunque l'entità padre Aeroporto si collega alle tre entità figlie tramite relazioni di identificazione (IS_REGIONALE, IS_HUB, IS_MILITARE). Ogni aeroporto conserva gli attributi comuni nel padre, mentre quelli specifici vanno nelle rispettive entità figlie. Questa soluzione centralizza le relazioni, semplificando le query, ma richiede l'implementazione di vincoli applicativi per assicurare che ogni aeroporto appartenga a una e solo a una categoria.

Aereo La generalizzazione su Aereo è totale e sovrapposta, in quanto un aereo può avere più ruoli operativi simultaneamente (per esempio, un aereo cargo può essere utilizzato anche come velivolo militare). Proprio per questa sovrapposizione, è fondamentale mantenere l'entità padre Aereo, che contiene gli attributi comuni (matricola, data_immatricolazione, ore_volo_accumulate). Le specializzazioni vengono rappresentate tramite le entità separate AereoDiLinea, AereoCargo, AereoPrivato e AereoMilitare, ciascuna collegata al padre attraverso relazioni di identificazione (IS_LINEA, IS_CARGO, IS_PRIVATO, IS_MILITARE) e attraverso la matricola (che funge da chiave primaria e chiave esterna). Questa soluzione permette di associare un singolo aereo a più categorie contemporaneamente, inserendo la stessa matricola in più tabelle figlie, evitando duplicazioni di attributi comuni e garantendo la coerenza nei dati condizionati. Eliminare il padre porterebbe a ridondanze e complessità nella gestione di aerei multi-ruolo.

Personale La generalizzazione su Personale è parziale e disgiunta. Non tutti i membri del personale svolgono ruoli specializzati e ciascun dipendente può appartenere al massimo a una sola delle categorie previste (pilota, controllore o manutentore). Mantenendo l'entità padre Personale, che contiene attributi comuni a tutti (identificativo, nome, cognome, data di nascita, data di assunzione), si creano tre entità figlie: Pilota, ControlloreVolo e Manutentore, collegate al padre tramite relazioni di identificazione (IS_PILOTA,

IS_CONTROLLORE, IS_MANUTENTORE) e tramite l'identificativo. La parzialità della gerarchia richiede il mantenimento del padre, poiché ci sono membri del personale (per esempio, personale amministrativo o di supporto) che non rientrano in nessuna specializzazione. La disgiunzione assicura che nessun dipendente possa ricoprire più ruoli specializzati contemporaneamente, mantenendo separate competenze e 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 un approccio di accorpamento nelle entità figlie, eliminando l'entità padre e creando tre entità indipendenti: LogGPS, LogDatiVolo e LogErrori. Ognuna di queste entità contiene sia attributi comuni (id_volo, timestamp_rilevazione, altitudine, velocità) sia specifici per la propria tipologia (ad esempio, latitudine e longitudine per i log GPS, o codice_errore e severità per i log di errore).

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

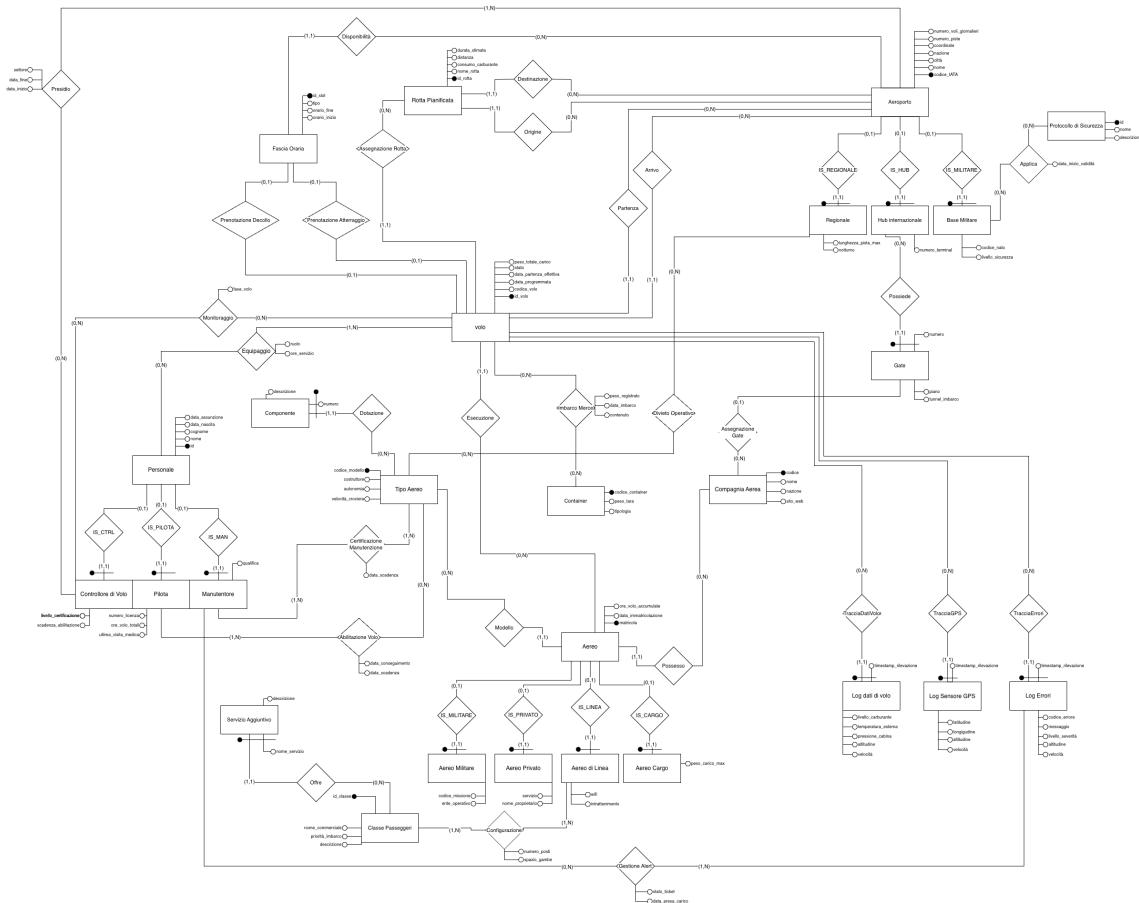


Figure 2: Diagramma Entità-Relazione Ristrutturato

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_IATA, nome, citta, nazione, coordinate, numero_piste, numero_voli_giornalieri)
- **HubInternazionale**(codice_IATA, numero_terminal) codice_IATA → Aeroporto.codice_IATA
- **Regionale**(codice_IATA, lunghezza_max_pista, notturno) codice_IATA → Aeroporto.codice_IATA
- **BaseMilitare**(codice_IATA, codice_nato, livello_sicurezza) codice_IATA → Aeroporto.codice_IATA
- **Voli**(id_volo, timestamp_rilevazione, altitudine, velocità, latitudine, longitudine, codice_errore, severità)
- **CompagniaAerea**(codice, nome, sede, web)
- **Personale**(codice, cognome, nome, data_nascita, qualifica)
- **TipiAereo**(codice, modello, categoria, autonave, numero_cabinieri, numero_passeggeri)
- **Aeroporto**(codice, nome, citta, nazione, coordinate, numero_piste, numero_voli_giornalieri)
- **HubInternazionale**(codice, nome, numero_terminal)
- **BaseMilitare**(codice, nome, nato, livello_sicurezza)
- **Gara**(codice, nome, data_inizio, data_fine)
- **ControlloDiVoli**(codice, nome, data_inizio, data_fine)
- **Pista**(codice, nome, data_inizio, data_fine)
- **Mandatario**(codice, nome, data_inizio, data_fine)
- **ServizioArgentario**(codice, nome, servizio)
- **Offerta**(codice, classe, nome, servizio)
- **ClassePassenger**(codice, nome_comune, prezzo_max, descrizione)
- **LogDatiVolo**(id_log, codice_volo, orario, durata, altezza, velocità, latitudine, longitudine)
- **LogSensoriGPS**(id_log, codice_volo, orario, messaggio, utilizzo, durata, latitudine, longitudine)
- **LogErrori**(id_log, codice_volo, orario, tipo_errori, durata, latitudine, longitudine)

- **ProtocolloSicurezza**(id_protocollo, nome, descrizione*)
- **Applica**(codice_IATA, id_protocollo, data_inizio) codice_IATA → BaseMilitare.codice_IATA id_protocollo → ProtocolloSicurezza.id_protocollo
- **Gate**(codice_hub, numero_gate, piano, tunnel) codice_hub → HubInternazionale.codice_IATA
- **DivietoOperativo**(codice_IATA, codice_modello) codice_IATA → Regionale.codice_IATA codice_modello → TipoAereo.codice_modello
- **TipoAereo**(codice_modello, costruttore, autonomia, velocita_crociera)
- **Componente**(codice_modello, numero_parte, descrizione) codice_modello → TipoAereo.codice_modello
- **Aereo**(matricola, data_immatricolazione, ore_volo_accumulate, codice_modello) codice_modello → TipoAereo.codice_modello
- **AereoDiLinea**(matricola, wifi, intrattenimento*) matricola → Aereo.matricola
- **AereoCargo**(matricola, peso_carico_max) matricola → Aereo.matricola
- **AereoPrivato**(matricola, proprietario, servizi_inclusi*) matricola → Aereo.matricola
- **AereoMilitare**(matricola, codice_missioni*, 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, Gate.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, codice_modello, data_conseguimento, data_scadenza) id_personale → Pilota.id_personale codice_modello → TipoAereo.codice_modello
- **RottaPianificata**(id_rotta, nome, distanza, durata_stimata, consumo_previsto, aeroporto_origine, aeroporto_destinazione) aeroporto_origine → Aeroporto.codice_IATA aeroporto_destinazione → Aeroporto.codice_IATA
- **FasciaOraria**(id_slot, codice_IATA, ora_inizio, ora_fine, tipologia) codice_IATA → Aeroporto.codice_IATA
- **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_IATA aeroporto_arrivo → Aeroporto.codice_IATA 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_IATA, data_inizio, data_fine*, settore) id_personale → ControlloreVolo.id_personale codice_IATA → Aeroporto.codice_IATA
- **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
- **ClassePasseggeri**(id_classe, nome_commerciale, priorita_imbarco, descrizione)
- **Configurazione**(matricola, id_classe, numero_posti, spazio_gambe) matricola → AereoDiLinea.matricola id_classe → ClassePasseggeri.id_classe
- **ServizioAggiuntivo**(id_classe, nome_servizio, descrizione*) id_classe → ClassePasseggeri.id_classe
- **LogGPS**(id_volo, timestamp_rilevazione, altitudine, velocita, latitudine, longitudine) id_volo → Volo.id_volo
- **LogDatiVolo**(id_volo, timestamp_rilevazione, altitudine, velocita, livello_carburante, pressione, temperatura) id_volo → Volo.id_volo
- **LogErrori**(id_volo, timestamp_rilevazione, altitudine, velocita, codice_errore, messaggio*, severita) id_volo → Volo.id_volo
- **GestioneAlert**(id_personale, id_volo, timestamp_rilevazione, stato, data_presa_carico*) id_personale → Manutentore.id_personale (id_volo, timestamp_rilevazione) → LogErrori(id_volo, timestamp_rilevazione)
- **CertificazioneManutenzione**(id_personale, matricola, data_certificazione, data_scadenza) id_personale → Manutentore.id_personale matricola → Aereo.matricola

5 Database PostgreSQL e Query

Query 1 – Piloti con il maggior numero di modelli di aereo abilitati

La seguente query determina quanti modelli di aereo diversi è abilitato a pilotare ciascun pilota. La query utilizza GROUP BY, funzioni di aggregazione e un join su tre tabelle (Personale, Pilota, AbilitazioneVolo).

```
SELECT
    p.id_personale,
    p.nome,
    p.cognome,
    COUNT(a.codice_modello) AS numero_modelli
FROM Personale p
JOIN Pilota pl ON p.id_personale = pl.id_personale
JOIN AbilitazioneVolo a ON pl.id_personale = a.id_personale
GROUP BY p.id_personale, p.nome, p.cognome
ORDER BY numero_modelli DESC;
```

Query 2 – Aeroporti con più traffico totale (arrivi + partenze)

La query calcola il numero complessivo di partenze e arrivi per ciascun aeroporto, valutando così il traffico totale. Utilizza join duplicati sulla tabella Volo e aggregazioni.

```
SELECT
    a.codice_IATA,
    a.nome,
    COUNT(v1.id_volo) AS partenze,
    COUNT(v2.id_volo) AS arrivi,
    COUNT(v1.id_volo) + COUNT(v2.id_volo) AS traffico_totale
FROM star.Aeroporto a
LEFT JOIN star.Volo v1 ON v1.aeroporto_partenza = a.codice_IATA
LEFT JOIN star.Volo v2 ON v2.aeroporto_arrivo = a.codice_IATA
GROUP BY a.codice_IATA, a.nome
ORDER BY traffico_totale DESC;
```

Query 3 – Compagnie con il numero totale di aerei posseduti

La query utilizza GROUP BY e l'operatore HAVING per selezionare solo le compagnie che possiedono più di un aereo.

```
SELECT
    c.codice_compagnia,
    c.nome,
    COUNT(p.matricola) AS numero_aerei
FROM star.CompagniaAerea c
JOIN star.Possesso p ON c.codice_compagnia = p.codice_compagnia
GROUP BY c.codice_compagnia, c.nome
HAVING COUNT(p.matricola) > 1
ORDER BY numero_aerei DESC;
```

Query 4 – Velocità media reale di ogni volo con almeno due rilevazioni GPS

Questa query calcola la velocità media dei voli utilizzando i dati registrati dai sensori GPS. Vengono considerati solo i voli con almeno due rilevazioni.

```
SELECT
    v.id_volo,
    v.codice_volo,
    AVG(l.velocita) AS velocita_media
FROM star.Volo v
JOIN star.LogGPS l ON v.id_volo = l.id_volo
GROUP BY v.id_volo, v.codice_volo
HAVING COUNT(l.timestamp_rilevazione) >= 2
ORDER BY velocita_media DESC;
```

Query 5 – Aerei più utilizzati: totale ore di volo reali per aereo

La query calcola le ore totali di volo accumulate da ogni aereo sulla base dei log GPS (differenza tra prima e ultima rilevazione). L'aggregazione utilizza funzioni temporali di PostgreSQL.

```
SELECT
    a.matricola,
    t.codice_modello,
    EXTRACT(EPOCH FROM (MAX(l.timestamp_rilevazione) - MIN(l.timestamp_rilevazione))) / 3600
        AS ore_volo_registrate
FROM Aereo a
JOIN star.TipoAereo t ON a.codice_modello = t.codice_modello
JOIN star.LogGPS l ON l.id_volo IN (
    SELECT id_volo FROM star.Volo WHERE matricola = a.matricola
)
GROUP BY a.matricola, t.codice_modello
ORDER BY ore_volo_registrate DESC;
```

Indice per l'ottimizzazione della query sul traffico aeroportuale

L'indice è stato introdotto per ottimizzare la query che calcola il traffico totale (arrivi + partenze) per ciascun aeroporto. In questa query, gli attributi aeroporto_partenza e aeroporto_arrivo della tabella Volo sono al centro delle operazioni di raggruppamento e dei due join che collegano i voli agli aeroporti.

```
CREATE INDEX idx_volo_partenza ON Volo(aeroporto_partenza);
CREATE INDEX idx_volo_arrivo ON Volo(aeroporto_arrivo);
```

La scelta di due indici dedicati consente a PostgreSQL di ridurre significativamente il costo dei join, evitando una doppia scansione completa della tabella Volo. In presenza degli indici, il planner può infatti eseguire ricerche mirate sulle tuple rilevanti e calcolare le aggregazioni (COUNT) quasi interamente tramite

index scan, minimizzando l'accesso alla tabella principale. Ciò garantisce un miglioramento sostanziale nelle query analitiche sul traffico aeroportuale.